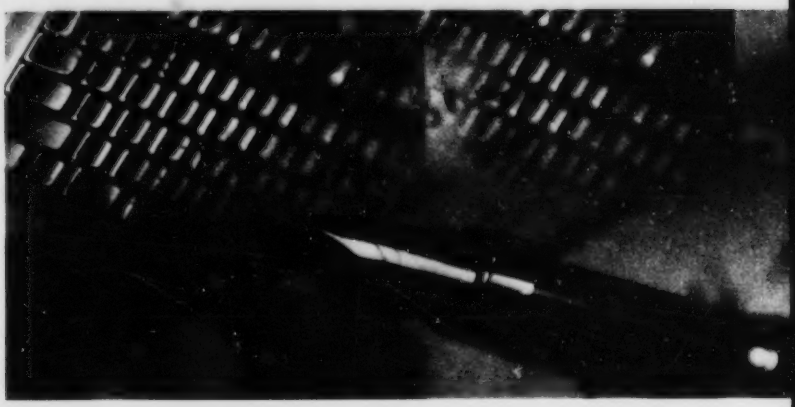
RAPPORT DE RECHERCHE

MÉTHODE D'ESTIMATION ÉNERGÉTIQUE DES BÂTIMENTS D'HABITATION BASÉE SUR L'APPLICATION DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE



SCHL CMHC

AU COEUR DE L'HABITATION

Canada

SCHL—Au cœur de l'habitation

La Société canadienne d'hypothèques et de logement (SCHL) est au cœur de l'habitation. Toutes ses activités visent à aider les Canadiens et les Canadiennes à vivre dans un logement sûr à tout point de vue.

À titre d'organisme national responsable du logement, la SCHL joue un rôle important dans le secteur canadien de l'habitation. Elle propose de nouvelles façons de financer l'achat des maisons. Elle favorise l'innovation dans le domaine de la technologie et de la conception des habitations. Grâce à son assurance prêt hypothécaire, elle aide les Canadiens et les Canadiennes à réaliser leur rêve et à posséder leur propre maison.

Les Canadiens et les Canadiennes tirent avantage de la collaboration de la SCHL avec ses partenaires des secteurs public, privé et sans but lucratif en vue d'améliorer la qualité et l'accessibilité des logements et de faire en sorte qu'ils soient plus abordables, partout au pays.

L'aide accordée par la SCHL permet aux ménages à faible revenu, aux aînés, aux personnes handicapées et aux Autochtones de vivre dans des logements convenables et abordables. La SCHL crée des emplois pour les Canadiens et les Canadiennes dans le domaine des produits et services en aidant le secteur de l'habitation à exporter ses connaissances et ses compétences dans d'autres pays.

Les recherches de pointe effectuées par la SCHL améliorent la qualité des logements et font en sorte que ceux-ci soient plus abordables. Afin d'aider les Canadiens et les Canadiennes à tirer profit de son savoir-faire dans le domaine de l'habitation et à prendre des décisions éclairées, la SCHL est devenue le plus important éditeur canadien de publications portant sur le logement. Elle possède également la collection la plus complète de documents sur l'habitat.

Les Canadiens et les Canadiennes peuvent avoir facilement accès à nos informations par l'entremise des points de vente et des bureaux régionaux de la SCHL.

Vous pouvez aussi communiquer avec nous par téléphone :
1 800 668-2642 [à l'extérieur du Canada : (613) 748-2003]
ou par télécopieur : (613) 748-4069.
Pour nous joindre en direct, visitez notre page d'accueil à l'adresse suivante : « www.cmhc-schl.gc.ca »

La Société canadienne d'hypothèques et de logement appuie la politique du gouvernement fédéral sur l'accès à l'information pour les personnes handicapées. Si vous désirez obtenir la présente publication en des médias substituts, composez le 1 800 668-2642.

100-07445/

MÉTHODE D'ESTIMATION ÉNERGÉTIQUE DES BÂTIMENTS D'HABITATION BASÉE SUR L'APPLICATION DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

par: Stanislaw Kajl
Marc-Antoine Roberge

février 1999

Agent du projet à la SCHL: Sandra Marshall

Ce projet a été réalisé grâce à une contribution financière de la Société canadienne d'hypothèques et de logement, dans le cadre du Programme de subventions de recherche (Dossier n° 6585-K048 de la SCHL). Les idées exprimées sont celles de l'auteur et ne représentent pas le point de vue officiel de la SCHL.

Université du Québec
École de technologie supérieure

Méthode d'estimation énergétique des bâtiments d'habitation basée sur l'application de l'intelligence artificielle

Rapport final

Présenté à: Madame Sandra Marshall
Société canadienne de l'hypothèque et de logement
700, chemin de Montréal
Ottawa, Ontario, K1A 0P7

Préparé par: Stanislaw Kajl
Marc-Antoine Roberge

Février 1999

École de technologie supérieure
1100, rue Notre-Dame Ouest
Montréal (Québec) H3C 1K3

RÉSUMÉ

L'objectif du projet est d'établir une méthode rapide d'estimations énergétiques des bâtiments d'habitation de 5 à 25 étages en appliquant les techniques de l'intelligence artificielle. La méthode doit être rapide et doit donner une large gamme de résultats tels les consommations totales d'énergie, les appels de puissance, les consommations de chauffage ou de refroidissement. La précision de la méthode doit être comparable à celle des logiciels de simulation énergétique détaillée des bâtiments. Pour atteindre les objectifs du projet, la méthodologie comporte les étapes suivantes :

1. Création des bases de données incluant :
   - Classification des paramètres utilisés dans les simulations énergétiques. Choix d'appartenance de ces paramètres à la classe « variables » ou « par défaut » ;
   - Modélisation dans le logiciel DOE-2 ;
   - Validation des modèles DOE-2.
2. Application des réseaux de neurones incluant :
   - Apprentissage des réseaux des neurones ;
   - Validation des résultats d'apprentissage des réseaux de neurones.
3. Conception d'un Système d'Aide aux Estimations Énergétiques (SAEE) des bâtiments à habitation ;
4. Validation du Système SAEE.

Création des bases de données

L'application des techniques de l'intelligence artificielle telles la logique floue ou des réseaux de neurones requise une base de connaissance (base de données). Elle sert soit à établir les règles floues soit à effectuer l'apprentissage des réseaux de neurones. Dans le cas de bâtiments d'habitation, la base de données relative aux bâtiments existants étant insuffisante, nous avons décidé de créer cette base en faisant les simulations énergétiques des bâtiments à l'aide du logiciel DOE-2. Afin de tenir compte des particularités de bâtiments d'habitation telles l'infiltration, l'effet de cheminée, l'emplacement des appartements (étage, orientation), le type de fenêtres, la résistance thermique de murs et de toit, l'horaire d'occupation etc. qui influencent fortement la consommation d'énergie, nous avons utilisé les bases de connaissances créées aux niveaux d'appartements et de corridors. Les paramètres variables et par défaut utilisés durant cette étape sont présentés sur le schéma ci joint. Compte tenu du pas de temps de calculs du logiciel DOE-2, on a trouvé préférable que les consommations d'énergie de certains postes tels les ascenseurs, l'éclairage extérieur, etc. proviennent des données statistiques relatives à ce type de bâtiments. Cette approche rend la méthode plus flexible parce que les données ainsi fournies peuvent être ajoutées aux résultats obtenus par l'application des réseaux de neurones. Un module de sommation permet de calculer la consommation totale du bâtiment.

Étant donné que la qualité de la base des données est un facteur crucial pour la précision de la méthode, la modélisation des appartements et des corridors dans le logiciel DOE-2 comprend certaines particularités comme par exemple :

- Pour tenir compte de l'infiltration, de l'orientation des murs extérieurs et de la localisation des appartements, le module d'intelligence artificielle comporte 8 modèles d'appartement (4 situés aux coins et 4 pour les orientations principales) par étage type. Les étages types sont

les suivants : le rez-de-chaussée, l'étage au niveau neutre du point de vue de l'effet de cheminée et le dernier étage sans et avec toiture.

- Pour une meilleure simulation du comportement thermique des appartements nous avons développé et introduit au modèle d'appartements trois nouvelles fonctions permettant la simulation des opérations spécifiques relatives aux contrôles : (1) de l'éclairage et des rideaux, (2) de l'ouverture des fenêtres et (3) de l'opération du système de ventilation des corridors.

Les modèles DOE-2 d'appartements et de corridors ont été validés par la comparaison des résultats obtenus à l'aide du logiciel DOE-2 et les consommations d'énergie enregistrées dans un bâtiment situé à Ottawa.

Application des réseaux de neurones

L'application de l'intelligence artificielle consiste, dans notre cas, à utiliser 27 réseaux de neurones. Trois réseaux de neurones pour l'estimation de la consommation d'énergie des corridors et 24 réseaux pour l'estimation de la consommation d'énergie des appartements. Pour l'apprentissage des réseaux de neurones, nous avons créé des bases de données comportant les résultats de 500 à 841 simulations. La validation de l'apprentissage des réseaux de neurones, a été réalisée sur une base de données comportant les résultats des 200 simulations et indépendante de la base utilisée pour l'apprentissage. On présente dans le tableau les résultats de l'analyse statistique pour valider l'apprentissage des réseaux des réseaux de neurones (le coefficient de variation CV et l'écart type ET). À titre d'exemple on ne présente que les résultats relatifs au premier étage.

Résultats d'apprentissage des réseaux de neurones

		Consommation d'électricité de base		*Consommation d'électricité de chauffage*		*Consommation d'électricité de refroidissement*	
Étage	*orientation*	*CV [%]*	*ET [kWh]*	*CV [%]*	*ET [kWh]*	*CV [%]*	*ET [kWh]*
Premier étage	*nord*	0.49	19.59	1.95	219.16	1.12	8.11
	sud	0.55	22.07	1.83	166.26	1.42	14.06
	ouest	0.39	15.27	1.17	134.71	1.33	13.61
	sud-ouest	0.77	30.72	2.89	570.85	1.96	22.58

L'analyse des résultats permet de constater que les coefficients de variation sont très faibles, sauf pour les appartements orientés au sud situés à l'étage du milieu et au dernier étage sans toiture (*en particulier pour le chauffage*). Cela s'explique entièrement par les grandeurs de la consommation d'énergie pour le chauffage qui est, souvent dans ces cas, pratiquement nulle en raison des gains d'ensoleillement, des gains internes et de l'effet de cheminée.

Conception d'un Système d'Aide aux Estimations Énergétiques (SAEE) des bâtiments à habitation

La méthode développée dans ce projet a été appliquée au Système d'Aide aux Estimations Énergétiques (SAEE) des bâtiments d'habitation dont le schéma est présenté ci-dessous. Nous avons conçu trois principales interfaces utilisateurs qui sont accessibles avec le logiciel *MATLAB*. La comparaison des résultats obtenus par le SAEE et les consommations d'énergie enregistrées dans un bâtiment situé à Ottawa démontre une très bonne précision du SAEE

(l'erreur est de 0% pour l'horaire d'occupation n°2 et de 5% pour l'horaire d'occupation n°1). Le système SAEE permet de déterminer la consommation annuelle d'énergie de chauffage de refroidissement et de base (utilitaires et éclairage) pour appartements et corridors en fonction de leur emplacement en faisant varier les paramètres variables. Le SAEE permet d'analyser l'impact de ces paramètres sur la consommation d'énergie dans les bâtiments d'habitation tout en tenant compte de l'interaction entre les systèmes CVCA et l'enveloppe du bâtiment étudié.

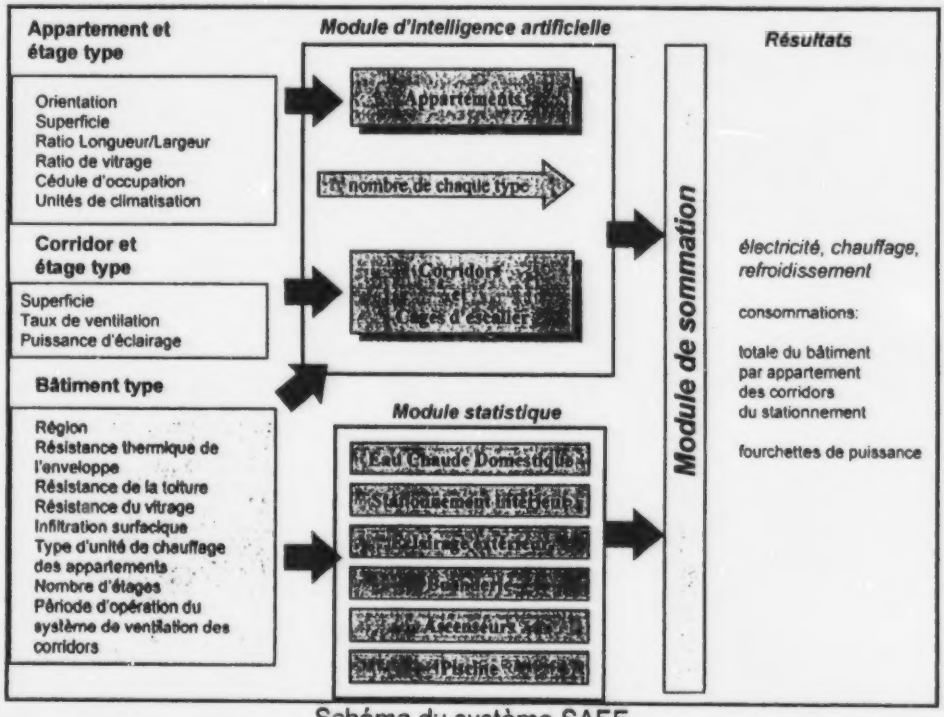


Schéma du système SAEE

Le schéma présente la structure du SAEE développé dans ce projet. Les paramètres variables sont présentés dans la partie gauche tandis que les résultats dans la partie droite du schéma. Tel que déjà mentionné les résultats peuvent être davantage détaillés en tenant compte de l'emplacement et de l'orientation d'appartements.

Le SAEE permet d'analyser l'impact des paramètres variables sur la consommation d'énergie dans les bâtiments d'habitation, mais il faut noter que le SAEE n'est qu'un outil d'estimation et son rôle n'est pas de remplacer les logiciels de simulation détaillée tel que DOE-2. Le rôle du SAEE est plutôt de remplir le vide qui existe entre les méthodes simples d'estimations énergétiques (degrés-jours, Bin) et les simulations détaillées des bâtiments.

Le SAEE est développé pour les conditions climatiques d'Ottawa. Pour l'utiliser dans les conditions climatiques différentes il faut faire une correction appropriée de la consommation de chauffage et de refroidissement. Pour éviter ces corrections, dans la prochaine application de la méthode à la conception d'un autre système SAEE il faudrait envisager de considérer certaines caractéristiques de fichier climatique comme les paramètres variables. Il est évident que l'étape de la création de la base des données pour l'apprentissage des réseaux de neurones doit être modifiée en conséquence.

Le système SAEE a été développé dans l'environnement du logiciel MatLab. Pour une utilisation plus large du SAEE il est nécessaire de traduire le code du SAEE en langage C++. Les interfaces d'entrée des données et de résultats peuvent être aussi modifiées pendant cette étape selon les besoins définis par la SCHL.

SUMMARY

The objective of the project is to develop a rapid method for estimating energy consumption in residential buildings of 5 to 25-floors by applying artificial intelligence techniques. The method must be rapid and must generate a wide range of results such as total energy consumption, power demands, heating or cooling consumption. The method's accuracy must be comparable to that of the detailed building energy simulation software. To reach the project's objectives, the methodology comprises the following steps:

1. Creation of databases including:
   - Classification of the parameters used in the energy simulations. Choosing which of these parameters belong in "variable" or "default" categories;
   - Modelling in the DOE-2 software;
   - Validation of DOE-2 models.
2. Application of the neural networks including:
   - Teaching the neural networks;
   - Validation of the neural networks' learning;
3. Designing an Energy Estimate Assistance System (EEAS) for residential buildings;
4. Validation of the EEAS system.

Creating the Databases

The application of artificial intelligence techniques such as fuzzy logic or neural networks requires a knowledge base (database). It is used either to establish the fuzzy rules or to teach the neural networks. In the case of residential buildings, since the database related to existing buildings was inadequate, we decided to create the database by conducting building energy simulations using the DOE-2 software. To account for the residential building characteristics such as infiltration, the chimney effect, the location of the apartments (floor, orientation), the type of windows, the thermal resistance of the walls and roof, the occupancy schedule, etc., that have a major impact on energy consumption, we used the knowledge bases created for apartments and corridors. The variable and default parameters used during this phase are presented in the attached diagram. Considering the calculation time step of the DOE-2 software, we found it was preferable for items such as elevators, exterior lighting, etc., to use the statistical energy consumption data associated with this type of building. This approach makes the method more flexible because the data provided this way can be added to the results obtained by the neural network application. A summation module performs the calculation of the building's total consumption.

Since the quality of the database is a critical factor in the method's accuracy, the apartment and corridor modelling in the DOE-2 software includes certain characteristics such as:

- To account for infiltration, the orientation of the exterior walls and the location of the apartments, the artificial intelligence module has 8 apartment models by typical floor (4 located in the corners and 4 for the primary orientations). The typical floors are the following: ground floor, the floor at the neutral level with respect to the chimney effect and the last floor with and without the roof.
- To better simulate the apartments' thermal behaviour, we developed and introduced three new functions to the apartment model that allow simulating specific control operations: (1) lighting and draperies, (2) opening windows and (3) operating the corridor ventilation system.

The DOE-2 apartment and corridor models were validated by comparing the results obtained with the DOE-2 software to the energy consumption recorded in a building located in Ottawa.

Neural Network Application

In our case, the artificial intelligence application consists of using 27 neural networks; three neural networks to estimate corridor energy consumption and 24 to estimate apartment energy consumption. To teach the neural networks, we created databases containing the results of between 500 and 841 simulations. What the neural networks learned was validated using a database containing the results of 200 simulations and independently from the base used for teaching. The results of the statistical analysis used to validate the neural network learning (the coefficient of variation CV and the standard deviation SD) are shown in the table. For this example, we show only the results for the first floor.

Results of the neural network learning

		Basic Electrical Consumption		*Heating Electrical Consumption*		*Cooling Electrical Consumption*	
Floor	*Orientation*	CV (%)	SD (kWh)	CV (%)	SD (kWh)	CV (%)	SD (kWh)
First Floor	*North*	0.49	19.58	1.95	219.16	1.12	8.11
	South	0.55	22.07	1.83	166.25	1.42	14.06
	West	0.39	15.27	1.17	134.71	1.33	13.61
	Southwest	0.77	30.72	2.89	570.85	1.96	22.58

Analysis of the results shows that the coefficients of variation are very low, except for the apartments facing south located on the middle and last floors without roofing (*particularly for heating*). This is wholly explained by the amount of energy consumed for heating, which in these cases is often almost nil because of the gains from sunshine, from the internal gains and from the chimney effect.

Design for an Energy Estimate Assistance System (EEAS) for Residential buildings

The diagram for the method developed in this project and applied to the Energy Estimate Assistance System for residential buildings is shown below. We designed three primary user interfaces that can be accessed with the *MATLAB* software. Comparing the results obtained by the EEAS to the energy consumption recorded in a building located in Ottawa shows the EEAS's high level of accuracy (error is 0% for occupancy schedule 2 and 5% for occupancy schedule 1). By varying the variable parameters, the EEAS system can determine the annual energy consumption for heating, cooling and basic usage (utilities and lighting) for apartments and corridors according to their location. The EEAS system allows the impact of these parameters on energy consumption to be analyzed in apartment building while accounting for the interaction between the HVAC systems and the building envelope being studied.

a. **Typical apartment and floor**
Orientation
Area
Length/width ratio
Glass ratio
Occupancy schedule
Air conditioning units

Typical corridor and floor
Area
Ventilation rate
Lighting level

Typical building

Region
Thermal resistance of envelope
Resistance of roofing
Resistance of glass
Surfacique infiltration
Type of apartment heating unit
Number of floors
Operating period of corridor ventilation system

b. **Artificial Intelligence Module**
Apartments
Number of each type
Corridors and stairwells
Domestic hot water
Indoor parking
Exterior lighting
Laundry
Elevators
Pool

c. **Summation Module**

d. **Results**
electricity, heating, cooling

Consumption:

building total
by apartment
by corridors
by parking

power ranges

EEAS System Diagram

The diagram shows the structure of the EEAS developed in this project. The variable parameters are presented in left portion of the diagram while the results are in the right portion. As already mentioned, more detailed results can be achieved by taking apartment location and orientation into account.

The EEAS can be used to analyze the impact of the variable parameters on energy consumption in residential buildings but, it must be noted that the EEAS is only an estimating tool and it is not intended to replace detailed simulation software such as DOE-2. Instead, EEAS's role is to fill the gap that exists between simple energy estimation methods (degree-days, Benne) and detailed building simulations.

The EEAS has been developed for Ottawa climate conditions. To use it in different climate conditions, the appropriate adjustment must be made to heating and cooling consumption. To avoid these adjustments the next time the method is applied to designing another EEAS system, thought should be given to accommodating certain characteristics such as the variable parameters in the climate record. It is obvious that the step to create the database for teaching the neural networks has to be modified in consequence.

The EEAS system was developed on the MATLAB software platform. To use the EEAS more extensively, it is necessary to translate the EEAS code into C++. At this stage, the data input interfaces and the results can also be modified according to the needs defined by CMHC.

Tables des matières

page

Table des figures 3
Table des tableaux 4
1. Introduction 6
2. Objectif du projet 8
3. Méthodologie 9
4. Création des bases de données 12
4.1 Structure du SAEE 12
4.2 Paramètres variables et paramètres par défaut 14
4.2.1 Modèle des appartements 15
4.2.2 Modèle des corridors et des cages d'escaliers 18
4.3 Description des horaires 19
4.3.1 Opération du système de ventilation des corridors 19
4.3.2 Horaires d'occupation 19
4.3.3 Opération des équipements électriques 20
4.4 Modélisation dans le logiciel DOE-2 23
4.4.1 Description des fonctions 24
4.5 Résultats du Système d'Aide aux Estimations Énergétiques (SAEE) 29
5. Validation des modèles DOE-2 utilisés pour créer la base de données 30
5.1 Description du bâtiment étudié 30
5.2 Comparaison des résultats 32
6. Réseaux de neurones 38
6.1 Estimation de la consommation d'énergie des corridors 38
6.2 Estimation de la consommation d'énergie des appartements 38
6.3 Estimation de la puissance maximale de chauffage des appartements 40
6.4 Apprentissage des réseaux de neurones 40
7. Formules utilisées 44
7.1 Analyse statistique 44
7.2 Formules utilisées pour l'estimation des puissances 44
7.3 Formules utilisées dans le module de sommation du SAEE 45

7.3.1. Hypothèses sur les puissances maximales de chauffage et de base du bâtiment 46
8. Validations des modules d'intelligence artificielle 48
8.1 Conclusion 50
9. Interfaces du système SAEE 51
9.1 Interface pour l'introduction des paramètres et le calcul des résultats 51
9.1.1 Fenêtre du niveau d'intervention « bâtiment » 53
9.1.2 Fenêtre du niveau d'intervention « corridor » 54
9.1.3 Fenêtre du niveau d'intervention « appartements de coin » 56
9.1.4 Fenêtre du niveau d'intervention « appartements à une seule orientation » 57
9.1.5 Fenêtres de résultats 58
9.2 Interface pour la récupération des résultats d'une précédante analyse 60
9.3 Interface pour la récupération et la comparaison des résultats des précédantes analyses 61
9.4 Fichiers MATLAB d'opération des interfaces 64
10. Conclusions 67
11. Bibliographie 68
ANNEXE A 69
ANNEXE B 72

Table des figures

page

Figure 3.1 L'application des réseaux de neurones 9
Figure 3.2 Schéma de la création des bases de données 10
Figure 3.3 Schéma du SAEE 11
Figure 4.1 Schéma détaillé du SAEE 14
Figure 4.2 Organigramme de la fonction SOLEIL.INP 25
Figure 4.3 Organigramme de la fonction INFIL-1.INP 26
Figure 4.4 Organigramme de la fonction INFIL-2.INP 27
Figure 5.1 Schéma du bâtiment étudié 32
Figure 9.1 La fenêtre du menu principal 52
Figure 9.2 La fenêtre de paramètres généraux du bâtiment 53
Figure 9.3 La fenêtre du niveau bâtiment 54
Figure 9.4 La fenêtre des paramètres des corridors 55
Figure 9.5 La fenêtre du niveau corridors 55
Figure 9.6 La fenêtre des paramètres des appartements de coins 56
Figure 9.7 La fenêtre des paramètres des appartements avec une orientation 57
Figure 9.8 La fenêtre principale de résultats 58
Figure 9.9 La fenêtre de résultats d'étage type 59
Figure 9.10 La répartition des résultats 59
Figure 9.11 La fenêtre d'enregistrement des résultats 60
Figure 9.12 La fenêtre de récupération des résultats 61
Figure 9.13 La fenêtre de récupération des résultats 61
Figure 9.14 La fenêtre de récupération des résultats de référence 62
Figure 9.15 La fenêtre de récupération des résultats à comparer 62
Figure 9.14 La fenêtre des résultats de comparaison 63

Table des tableaux

page

Tableau 4.1 Paramètres variables 15
Tableau 4.2 Paramètres par défauts (module LOAD dans le logiciel DOE-2) 16
Tableau 4.3 Paramètres par défauts (module SYSTEMS dans le logiciel DOE-2) 17
Tableau 4.4 Paramètres variables 18
Tableau 4.5 Paramètres par défauts (module LOAD dans le logiciel DOE-2) 18
Tableau 4.6 Paramètres par défauts (module SYSTEMS dans le logiciel DOE-2) 18
Tableau 4.7 Définition des horaires d'opération des ventilateurs de corridors 19
Tableau 4.8 L'horaire pour les jours de semaine relative aux appartements inoccupés 20
Tableau 4.9 L'horaire pour les jours de semaine relative aux appartements occupés ... 20
Tableau 4.10 L'horaire pour la fin de semaine relative aux appartements occupés et inoccupés 20
Tableau 4.11 Caractéristiques des équipements ménagers 21
Tableau 4.12 L'horaire d'opération et de dégagement de chaleur des équipements ménagers pour les jours de semaine relative aux appartements inoccupés. 22
Tableau 4.13 L'horaire d'opération et de dégagement de chaleur des équipements ménagers pour les jours de semaine relative aux appartements occupés 22
Tableau 4.14 L'horaire d'opération et de dégagement de chaleur des équipements ménagers pour la fin de semaine relative aux appartements inoccupés 22
Tableau 4.15 L'horaire d'opération et de dégagement de chaleur des équipements ménagers pour la fin de semaine relative aux appartements occupés 23
Tableau 4.16 Les variables utilisées dans les fonctions 28
Tableau 5.1 Résumé des données portant sur le bâtiment étudié 31
Tableau 5.2 Résultats de simulation avec l'horaire d'occupation n° 2 (appartements occupés) 35
Tableau 5.3 Résultats de simulation avec l'horaire d'occupation n° 1 (appartements inoccupés) 36
Tableau 5.4 Consommation totale d'énergie et consommation de chauffage dans le bâtiment étudié (eau chaude, ascenseurs et buanderie exclus) 37
Tableau 6.1 Résultats d'apprentissage des réseaux de neurones 41
Tableau 6.2 Répartition des résultats de l'analyse par tranches de consommation 42

Tableau 6.3 Résultats d'apprentissage des réseaux de neurones 43

Tableau 8.1 Résultats obtenus par les réseaux de neurones avec l'horaire d'occupation n° 2 (appartements occupés) 48

Tableau 8.2 Résultats obtenus par les réseaux de neurones avec l'horaire d'occupation n° 1 (appartements inoccupés) 49

Tableau 8.3 Consommations totales d'énergie dans le bâtiment étudié (eau chaude, ascenseurs et buanderie exclus) 49

Tableau A.1 Répartition de la consommation de base 69

Tableau A.2 Les consommations d'énergie par l'éclairage et les équipements 70

Tableau A.3 Déperditions et gains de chaleur 70

1. Introduction

Depuis un certain temps, l'un des principaux objectifs de notre société est l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments. Étant donné l'importance de cet objectif, les méthodes d'analyse nécessaires à l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments doivent être fiables et efficaces. La classification la plus connue de ces méthodes est celle selon la complexité des calculs. On distingue dans cette classification les méthodes simplifiées (règles du pouce, tranches des températures (BIN), degrés-jours, etc.) et les méthodes détaillées où interviennent des logiciels d'analyse détaillée (DOE-2, BLAST). Les méthodes simplifiées sont rapides et facile d'utilisation, par contre elles sont peu précises et la gamme de leurs résultats est limitée.

Les méthodes détaillées d'analyse énergétique n'ont pas les inconvénients mentionnés ci-dessus, mais elles exigent une collecte de données assez fastidieuse. De plus, la préparation de fichiers d'entrées n'est pas une tâche facile. Une simplification appropriée du bâtiment réel et la création des fichiers d'entrées dépendent souvent de l'expérience de l'analyste, ce qui peut avoir un impact important sur les résultats d'analyse. Cette étape pourrait parfois constituer un obstacle majeur pour l'acceptation des logiciels utilisés dans les méthodes détaillées d'analyse énergétique.

En pratique, le choix de la méthode d'analyse énergétique dépend souvent des besoins. Ces besoins sont différents à l'étape préliminaire du projet, lors de sa conception ou dans la phase d'exploitation du bâtiment. Pour certains cas (par exemple : un bâtiment très complexe, l'optimisation du contrôle centralisé d'un bâtiment existant etc.) une analyse énergétique détaillée à l'aide des logiciels d'analyse est indispensable. Cependant, si l'analyse porte seulement sur la rentabilité de simples mesures d'économie d'énergie, telle l'implantation de l'éclairage efficace, une méthode simplifiée sera sûrement utilisée. Même si l'application de cette méthode serait justifiée, il est évident qu'elle ne tiendra pas compte de l'interaction entre l'éclairage et les systèmes CVCA (chauffage, ventilation et conditionnement d'air), de plus les résultats relatifs au changement de la consommation d'énergie et de la puissance électrique appelée du bâtiment ne seront qu'approximatifs.

Malgré ces inconvénients, les méthodes simplifiées sont largement utilisées dans les estimations rapides de consommation d'énergie et lors des phases préliminaires de projets. Parfois durant la phase préliminaire de projets, il faut prendre des décisions exigeant des estimations précises sur les consommations d'énergie et sur les puissances appelées. On peut citer par exemple : le choix des sources d'énergie ou les décisions relatives aux éléments architecturaux du bâtiment (la forme, la fenestration, la résistance thermique des mur extérieurs etc.). Les méthodes simplifiées, dans ces cas, ne sont pas appropriées, tandis que l'analyse détaillée à l'aide des logiciels DOE-2 ou BLAST soulève une réticence importante. Pour remédier à cette situation, *une méthode qui conserve les avantages des méthodes simplifiées et possède une précision comparable aux analyses énergétiques détaillées est très souhaitable*. Cette nouvelle

méthode pourrait combler les lacunes dans le domaine d'estimation énergétique des bâtiments et plus précisément elle permettra de combler le vide entre les méthodes simplifiées et détaillées.

L'application de l'intelligence artificielle telles la logique floue et les réseaux de neurones est une approche tout à fait nouvelle dans le domaine énergétique des bâtiments. Kreider et autres [1] et Kajl [2] présentent certaines applications de l'intelligence artificielle, mais elles concernent une autre problématique, notamment la prédiction de la charge de chauffage ou de refroidissement dans les bâtiments. Kajl et autres [3] de l'ÉTS (École de technologie supérieure) ont déjà développé une méthode d'estimation énergétique des bâtiments fondée seulement sur la logique floue appelée ici « Floue ». C'est une méthode simple ne permettant de faire varier que cinq paramètres tels le nombre d'étages, la fenestration, l'éclairage, le débit d'air frais et le débit de ventilation. Les résultats obtenus par l'application de cette méthode aux édifices à bureaux démontrent sa précision et sa rapidité [3]. Elle a mérité le premier Prix en recherche et développement du GALA ÉNERGIA 1995 de l'Association Québécoise pour la Maîtrise de l'Énergie (AQME). En tenant compte de ces fructueuses applications de l'intelligence artificielle dans ce domaine, elle sera aussi appliquée dans la méthode développée dans ce projet.

2. Objectif du projet

L'objectif de la recherche est d'établir une méthode rapide d'estimations énergétiques des bâtiments en appliquant les techniques de l'intelligence artificielle. La méthode doit donner une large gamme de résultats tels les consommations totales d'énergie, les appels de puissance, les consommations de chauffage ou de refroidissement. En plus, elle doit être rapide et la précision de la méthode doit être comparable à celle des logiciels de simulation énergétique détaillée des bâtiments. Une fois la méthode développée, elle sera appliquée pour concevoir un Système d'Aide aux Estimations Énergétiques (SAEE) des bâtiments du secteur de l'habitation qui pourra être utilisé par les architectes, les ingénieurs et les gestionnaires d'immeubles.

L'utilisation du SAEE permettra d'augmenter la performance énergétique du bâtiment parce que, déjà dans la phase préliminaire du projet, elle permettra :

- d'analyser l'impact des principaux paramètres énergétiques des bâtiments ;
- de tenir compte de l'interaction entre les systèmes CVCA et l'enveloppe du bâtiment étudié ;
- d'obtenir les résultats dont la précision est équivalente à celle du logiciel DOE-2 ;
- d'obtenir une gamme de résultats beaucoup plus large que celle donnée par les méthodes simplifiées.

3. Méthodologie

L'application de la logique floue ou des réseaux de neurones requise une base de connaissance (base de données). Elle sert soit à établir les règles floues soit à effectuer l'apprentissage des réseaux de neurones. Dans le cas de bâtiments d'habitation, la base de données pertinentes étant insuffisante, nous avons décidé de créer cette base en faisant les simulations énergétiques des bâtiments à l'aide du logiciel DOE-2. La figure 3.1 présente l'idée principale de l'application de réseaux de neurones à la méthode développée.

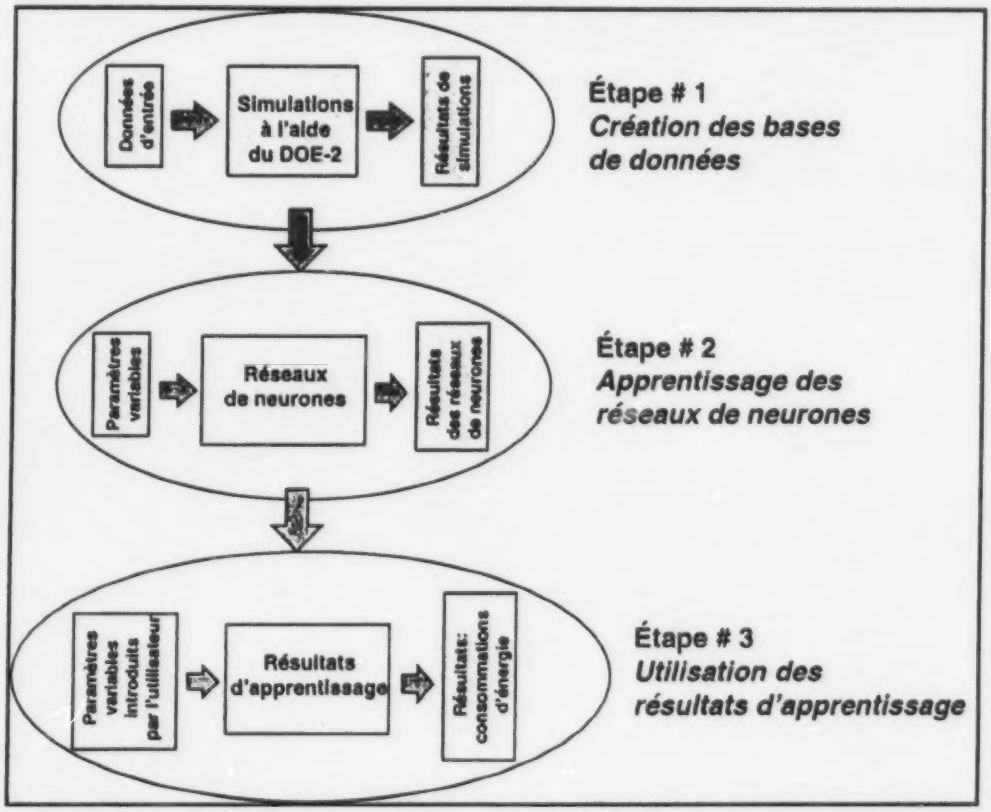


Figure 3.1 L'application des réseaux de neurones

La création des bases de données consiste donc à réaliser les simulations énergétiques des bâtiments à l'aide du logiciel DOE-2. Il y a au moins deux notes générales relatives à ces simulations qui doivent être mentionnées ici.

Note n°1 : pour un modèle complet d'un bâtiment dans le logiciel DOE-2 il faut prendre en considération beaucoup des paramètres. Ces paramètres peuvent être regroupés dans deux classes. À la première classe (paramètres variables) appartiennent les paramètres qui influencent le plus la consommation d'énergie. À

la deuxième classe (paramètres par défaut) appartiennent les paramètres qui ne varient pas beaucoup d'un bâtiment à l'autre (exemple : température de consigne) ainsi que les paramètres dont l'impact sur la consommation d'énergie est faible (exemple : type de cadres de fenêtres).

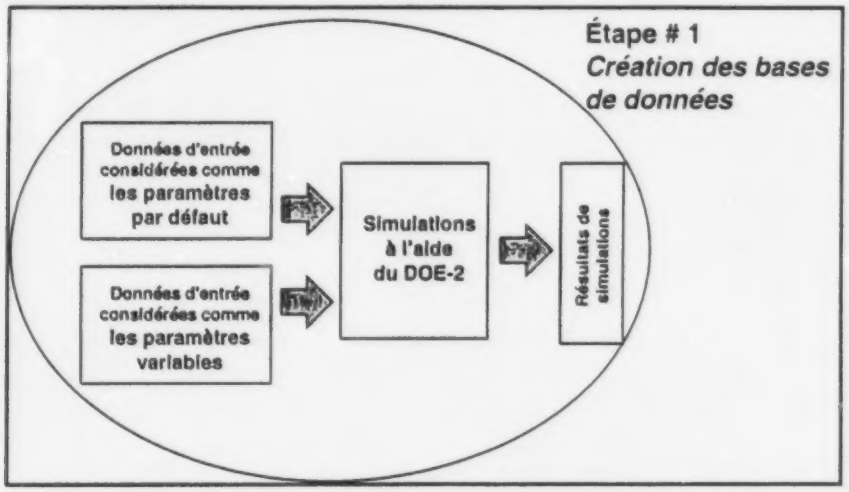


Figure 3.2 Schéma de la création des bases de données

En tenant compte de ce regroupement des paramètres, la création des bases de données peut être détaillée davantage par rapport à la figure précédente. Ces détails sont présentés sur la figure 3.2.

Note n°2 : un bâtiment d'habitation comporte plusieurs types d'appartements dont la consommation d'énergie est, entre autres, une fonction des données climatiques. Par contre, la consommation d'énergie des certaines zones spécifiques, telles la buanderie, les ascenseurs, les garages souterrains etc., ne dépend pas directement des données climatiques. L'utilisation d'énergie dans ces zones est très aléatoire et par conséquent difficile à simuler par un logiciel. Elle dépend surtout de nombre des occupants, de nombre des voitures (garage souterrain) etc. et devrait être déterminée plutôt par des données statistiques que par la simulation.

En tenant compte de cette particularité, le Systèmes d'Aide aux Estimations Énergétiques (SAEE) pour les bâtiments d'habitation aura le schéma présenté sur la figure 3.3.

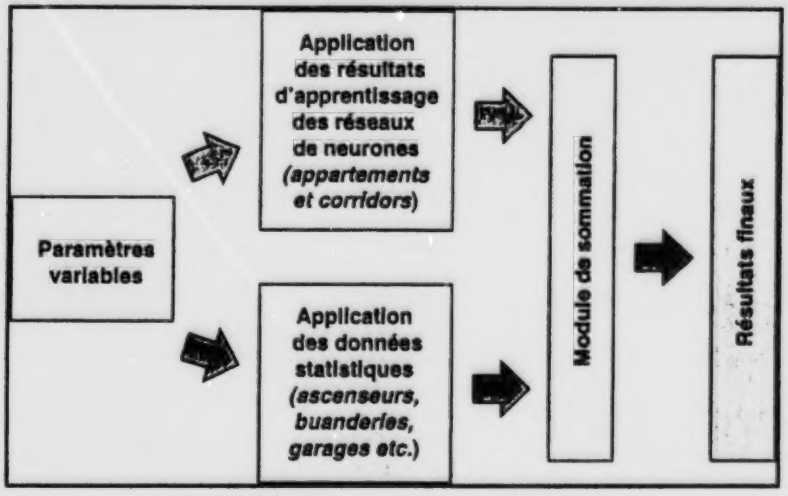


Figure 3.3 Schéma du SAEE

Pour atteindre les objectifs du projet tout en tenant de ce qui est mentionné ci-dessus, la méthodologie comportera les étapes suivantes :

1. Création des bases de données incluant :
    - Classification des paramètres utilisés dans les simulations énergétiques. Choix d'appartenance de ces paramètres à la classe « variables » ou « par défaut » ;
    - Modélisation dans le logiciel DOE-2 ;
    - Validation des modèles DOE-2.
2. Application des réseaux de neurones incluant :
    - Apprentissage des réseaux des neurones ;
    - Validation des résultats d'apprentissage des réseaux de neurones ;
3. Conception d'un Système d'Aide aux Estimations Énergétiques (SAEE) des bâtiments à habitation ;
4. Validation du Système SAEE.

4. Création des bases de données

Tel que mentionné dans le chapitre précédent, le futur utilisateur du système SAEE, pour obtenir les résultats, n'aura qu'à introduire les paramètres variables concernant le bâtiment étudié. Ces paramètres seront variables dans les simulations énergétiques des bâtiments qui servent à la création de base de données. Tous les autres paramètres intervenant pendant ces simulations sont considérés comme les paramètres par défaut. Ils ne pourront pas être changés par l'utilisateur de SAEE. Par conséquence, l'objectif principal de cette étape était de classifier des paramètres énergétiques et de sélectionner les paramètres variables pour le système d'aide aux estimations énergétiques des bâtiments d'habitation de 5 étages et plus (SAEE). Cette classification est basée sur la recherche bibliographique et l'analyse des rapports de la SCHL portant sur les bâtiments à habitation. La liste des principaux documents étudiés est présentée dans la bibliographie.

Il est à souligner que parfois les données autant pour certains paramètres variables que pour certains paramètres par défaut ne sont pas disponibles dans les documents cités. À titre d'exemple on peut citer :

- les horaires d'occupation et d'utilisation des équipements dans les appartements ;
- les habitudes des occupants relatives à l'ouvertures des fenêtres, l'utilisation de protection solaire ou l'ouverture de l'éclairage ;
- le type de la protection solaire le plus souvent utilisée.

Par contre, la disponibilité des données était satisfaisante en ce qui concerne les autres paramètres comme par exemple : la résistance des murs extérieurs et des toitures, la fenestration (%), les périodes d'opération du système de ventilation des corridors, le nombre d'étages, l'importance de l'effet de cheminé dans l'infiltration, etc....

Étant donné que la structure du future Système d'Aide aux Estimations Énergétiques (SAEE) peut influencer la classification des paramètres et la modélisation dans le logiciel DOE-2, avant de présenter les paramètres variables et par défaut, on présent d'abord la structure du SAEE.

4.1 Structure du SAEE

La base des données, qui servira à l'apprentissage des réseaux de neurones, comprendra les résultats des simulations des bâtiments à habitation faites à l'aide du logiciel DOE-2. Pour compléter la conception du SAEE il faudra aussi disposer des données statistiques sur les consommations d'énergie des ascenseurs, des buanderies, d'eau chaude sanitaire donc des données qui dépendent surtout des nombre d'occupants et de superficie du bâtiment. Par conséquence, le SAEE peut être composé

de deux modules de calculs et un module de sommation. Le premier module permettra de calculer les consommations d'énergie des appartements et des corridors en utilisant les réseaux de neurones. Le deuxième module permettra les calculs des consommations d'énergie des ascenseurs, des buanderies etc. selon les données statistiques. Ce module sera ajouté après avoir obtenu les données statistiques adéquates sur les consommations d'énergie de ces locaux spécifiques des bâtiments. Le troisième module (module de sommation) permettra de calculer la consommation totale du bâtiment. Ce dernier module servira aussi à estimer les appels de puissance électrique du bâtiment étudié. Les résultats de ces estimations, au lieu d'être présentés sous forme d'une valeur exacte, seront présentés sous forme d'une fourchette des appels de puissance pour, au moins, deux raisons suivantes :

- le pas de temps de simulation à l'aide du logiciel DOE-2 est d'une heure tandis que certains équipements fonctionnent en moyenne moins qu'une heure à pleine puissance ;
- les profils d'occupation et d'utilisation des équipements proposés dans le SAEE, même s'ils sont très réalistes, peuvent différer de l'utilisation aléatoire des équipements dans les appartements. Cette différence, ayant faible impact sur la consommation d'énergie, pourra influencer les appels de puissance électrique du bâtiment.

Le SAEE ainsi conçu comprendra:

1. une interface d'introduction des paramètres variables ;
2. un module de calculs par réseaux de neurones (appelé module d'intelligence artificielle) ;
3. un module de calculs basé sur les données statistiques (appelé module statistique)
4. un module de sommation (les consommations d'énergie) et d'estimation (les puissances maximales appelées) ;
5. une interface de résultats.

Le schéma du SAEE est présenté sur la figure 4.1. L'éclairage extérieur et la piscine sont présentés aussi sur le schéma, même si ces deux éléments ne sont pas pris en considération dans cette phase du développement du SAEE. Ils sont présentés pour souligner que la structure proposée du SAEE possède une flexibilité qui permettra, dans l'avenir, d'ajouter les différentes éléments de la consommation totale d'énergie.

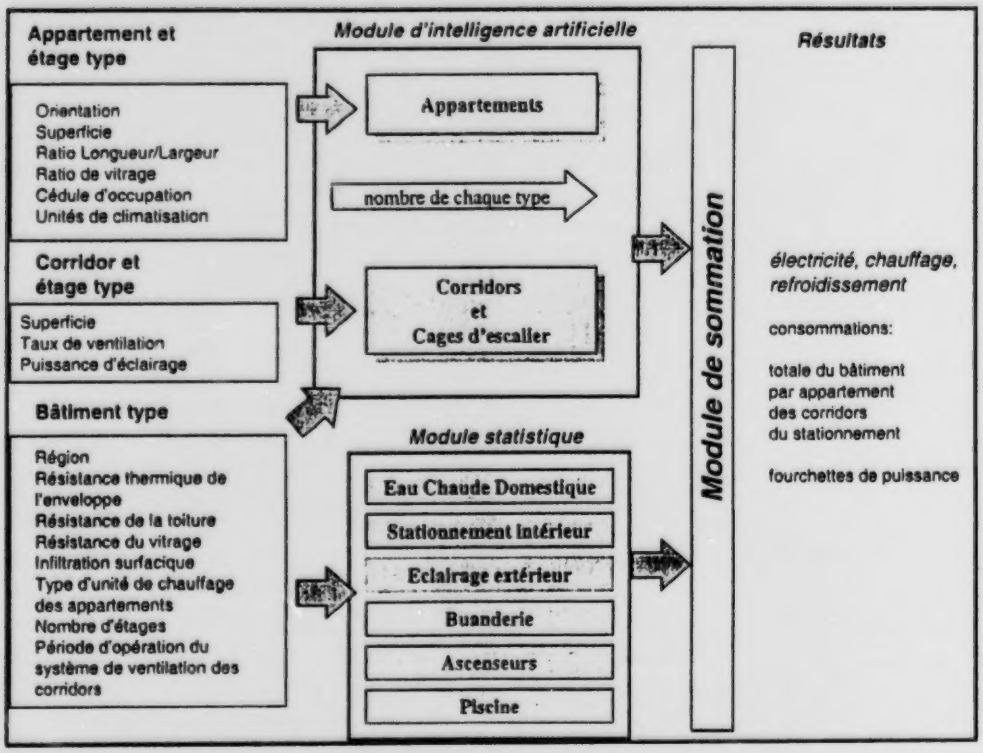


Figure 4.1 Schéma détaillé du SAEE

4.2 Paramètres variables et paramètres par défaut

Il résulte de la structure du SAEE que les bases de données servant à l'apprentissage des réseaux de neurones ne doivent être créées que pour les appartements et pour les corridors. C'est pour cette raison que les paramètres sont présentés dans deux paragraphes intitulés « Modèle des appartements » et « Modèle des corridors et des cages d'escaliers ». Les valeurs de paramètres présentées ci-dessous ont été tirées des documents de référence dont la liste est présentée dans la bibliographie. Les numéros de référence mentionnés dans les tableaux ci-dessous, correspondent à la numérotation des documents sur la liste.

Les valeurs discrètes des paramètres variables utilisées dans les simulations énergétiques des bâtiments, réalisées à l'aide du logiciel DOE-2, sont les mêmes que les valeurs proposées dans l'interface du Système SAEE conçu dans ce projet.

4.2.1 Modèle des appartements

Tableau 4.1 Paramètres variables

Région (localisation du bâtiment)	*Actuellement disponible OTTAWA (Ontario)* Québec, Ontario, Terre-Neuve, Île du Prince-Edouard, Nouvelle Écosse, Nouveau Brunswick, Manitoba, Alberta, Saskatchewan, Colombie Britannique
Orientation	Nord, Sud, Est, Ouest
Superficie des appartements	de 500 à 1500 pi^2 *[5]*
Ratio Longueur/Largeur	1.0, 1.5, 2.0, 2.5 *[6]*
Nombre d'étages	de 5 à 25 *[7]*
Résistance de l'enveloppe	de R5 à R25 *[6] [7]*
Résistance de la toiture	de R8 à R20 *[6] [7]*
Résistance du vitrage	de R0.8 à R1.2 (simple) de R1.5 à 2.4 (double) *[6] [7] [8]*
Ratio de vitrage *(a)*	0.1 à 0.35 *[6] [7] [11]*
Infiltration surfacique	1.0 à 12 L/(s.m^2) @ 75 Pa *[7]*
Horaire d'occupation	2 types de profils
Période d'opération du système de ventilation des corridors *(b)*	12/24h, 24/24h

(a) pour les appartements situés aux coins, le ratio de vitrage pourra s'étendre de 0.0 à 0.35;

(b) horaire d'opération proposée dans le chapitre « Description des horaires ».

Tableau 4.2 Paramètres par défauts (module LOAD dans le logiciel DOE-2)

Coefficient d'absorption du rayonnement solaire de l'enveloppe	0.65 *uncolored concrete [9]*
Masse de l'enveloppe	construction moyenne 70 lb/pi^3
Coefficient d'absorption du rayonnement solaire de la toiture	0.29 *gravel [9]*
Masse de l'appartement	construction moyenne 70 lb/pi^3
Coefficient d'ombre des rideaux choisi selon le type de fenêtres pour que shading coefficient (SC) soit égal à 0.5	SC total 0.5 *[6]* glass 0.88 (simple) 0.75 (double) *[9]* internal SC 0.5681 (simple) 0.6666 (double)
Niveau d'éclairement de référence dans l'appartement pour l'ouverture et la fermeture des rideaux	7432 lux,
Type d'appareils d'éclairage	incandescent, 19 Lumens/Watts
Niveau d'éclairement de l'éclairage	110 lux *[6]*
Éclairement de référence dans l'appartement pour l'ouverture et la fermeture de l'éclairage	148 lux
Puissance des équipements	voir le chapitre 3.3
Horaire d'utilisation des équipements	voir le chapitre 3.3
Hauteur des appartements	9 pi *[6]*
Hauteur des fenêtres	5 pi
Type de cadre de fenêtre	aluminium (simple, GCx1.0) (double, GCx1.1) *[9]*
Température intérieure de calcul	71.5°F température moyenne (68-75°F)

Tableau 4.3 Paramètres par défauts (module SYSTEMS dans le logiciel DOE-2)

Température de consigne des appartements en période de chauffage	68°F *[5]*
Limite (température extérieure) de la disponibilité du chauffage	Toujours disponible
Température de consigne des appartements en période de refroidissement	75°F
Limite (température extérieure) de la disponibilité du refroidissement	70°F
Bande d'étranglement des thermostats	3°F
Limite inférieure (température intérieure) pour l'ouverture des fenêtres	68°F + (bande d'étranglement)/2
Limite supérieure (température intérieure) pour l'ouverture des fenêtres	75°F - (bande d'étranglement)/2
Température extérieure de référence pour l'ouverture des fenêtres	50°F
Taux de changement d'air lors de l'ouverture des fenêtres	0.5 ch/h
Puissance des plinthes par l'unité de surface	100 W/m^2
Puissance des unités de refroidissement	100 W/m^2
Coefficient de performance (COP) des unités de refroidissement	2.28 *[9]*
Débit des unités de refroidissement	10.76 cfm/m^2 (0.1076 cfm/W de refroidissement)
Puissance de ventilateur des unités de refroidissement	0.00007 kW/cfm *[9]*

4.2.2 Modèle des corridors et des cages d'escaliers

Tableau 4.4 Paramètres variables

Région (localisation du bâtiment)	*Actuellement disponible OTTAWA (Ontario)* Québec, Ontario, Terre-Neuve, Île du Prince-Edouard, Nouvelle Écosse, Nouveau Brunswick, Manitoba, Alberta, Saskatchewan, Colombie Britannique
Nombre d'étages	de 5 à 25 *[7]*
Superficie de plancher par étage	-
Taux de ventilation	0.02 à 0.6 CFM/pi^2 *[6]*
Puissance d'éclairage	0.4 à 1.2 W/pi^2
Période d'opération du système de ventilation des corridors	12/24h, 24/24h

Tableau 4.5 Paramètres par défauts (module LOAD dans le logiciel DOE-2)

Superficie de plancher pour le module de calcul	10000 pi^2
Masse des corridors et des cages d'escaliers	construction moyenne 70 lb/pi^3
Hauteur des corridors	9 pi *[6]*

Tableau 4.6 Paramètres par défauts (module SYSTEMS dans le logiciel DOE-2)

Température d'alimentation d'air pendant la période de chauffage	115°F
La disponibilité du chauffage	toujours disponible
Température d'alimentation d'air pendant la période de refroidissement	55°F
La disponibilité du refroidissement	toujours disponible
Température de consigne en période de chauffage	68°F
Température de consigne en période de refroidissement	75°F
Bande d'étranglement des thermostats	3°F
L'humidité	non contrôlée
Type de système de ventilation	100% d'air neuf [6]
Type d'opération des volets	fixe
Puissance des ventilateurs des unités de refroidissement	0.000587 kW/cfm *[9]*
Coefficient de performance (COP) de l'unités de refroidissement	2.77 *[9]*

4.3 Description des horaires

4.3.1 Opération du système de ventilation des corridors

Tel qu'il est déjà mentionné, on distingue deux périodes d'opération du système de ventilation des corridors : 12/24h et 24/24h. Pour la période de 12 heures, nous avons défini l'horaire d'opération suivante :

Tableau 4.7 Définition des horaires d'opération des ventilateurs de corridors

Heures	*Définition de la période*
00h00 à 07h00	système en arrêt
07h00 à 13h00	système en opération
13h00 à 16h00	système en arrêt
16h00 à 22h00	système en opération
22h00 à 24h00	système en arrêt

4.3.2 Horaires d'occupation

On distingue trois horaires d'occupation suivantes :

- Horaire pour ***les jours de semaine*** relative aux appartement appelés ***INOCCUPÉS*** dans lesquels les occupants *sont absents de 7H00 à 16H00 ;*
- Horaire pour ***les jours de semaine*** relative aux appartement appelés ***OCCUPÉS*** dans lesquels les occupants *sont toujours présents ;*
- Horaire d'occupation pour ***la fin de semaine*** relative aux appartement occupés et inoccupés dans lesquels les occupants *sont toujours présents.*

Pendant la présence des occupants on distingue aussi les périodes d'activité « énergétique » (l'éclairage, les équipements, le contrôle de l'ouverture des fenêtres, etc.) et les périodes sans cette activité. Dans les tableaux ci-dessous on présente donc les horaires en tenant compte de la présence des occupants et de l'activité « énergétique » de l'appartement. Chaque période dans ces horaires est donc définie comme suit :

- Les occupants présents : ***PRÉSENTS***;
- Les occupants absents : ***ABSENTS*** ;
- Les équipements, l'éclairage etc. sont utilisés : ***ACTIVE*** ;
- Les équipements, l'éclairage etc. ne sont pas utilisés : ***INACTIVE***.

Il est à noter que ces horaires, tant au niveau d'occupation qu'au niveau d'activité « énergétique », sont basées sur l'analyse des résultats d'un monitoring de bâtiments résidentiels au Québec. Ces trois horaires sont les suivantes :

Tableau 4.8 L'horaire pour les jours de semaine relative aux appartements inoccupés

Heures	*Définition de la période*
00h00 à 06h00	présents, inactive
06h00 à 07h00	Présents, active
07h00 à 16h00	absents, inactive
16h00 à 23h00	Présents, active
23h00 à 24h00	présents, inactive

Tableau 4.9 L'horaire pour les jours de semaine relative aux appartements occupés

Heures	*Définition de la période*
00h00 à 09h00	présents, inactive
09h00 à 23h00	présents, active
23h00 à 24h00	présents, inactive

Tableau 4.10 L'horaire pour la fin de semaine relative aux appartements occupés et inoccupés

Heures	*Définition de la période*
00h00 à 10h00	présents, inactive
10h00 à 23h00	présents, active
23h00 à 24h00	présents, inactive

4.3.3 Opération des équipements électriques

Pour représenter la charge électrique des appartements, nous avons défini quatre profils d'activité parce que les activités « énergétiques » pendant la fin de semaine sont différentes pour les appartements occupés et pour les appartements inoccupés. Tel qu'il est déjà mentionné, ces profils sont basés sur l'analyse des résultats d'un monitoring des bâtiments résidentiels au Québec. Cette analyse nous a permis certains constats qui sont pris en considération dans les horaires d'opération et de dégagement de chaleur des équipements ménagers. Ces constats sont les suivants :

- la puissance appelée pendant la fin de semaine relative aux appartements inoccupés est supérieure à celle relative aux appartements occupés ; il est à l'inverse s'il s'agit de la puissance appelée pendant la semaine ;
- la consommation hebdomadaire des appartements occupés est supérieure à celle des appartements inoccupés.

Les équipements ménagers sélectionnés et leurs caractéristiques ont été définis à partir d'études statistiques [12] [13] et ils sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 4.11 Caractéristiques des équipements ménagers

Équipement	*Puissance [Watts] (sensible %)*	*Consommation moyenne annuelle [kWh]*	*Nombre moyen d'heure opération par année*	*Nombre moyen d'heure opération par jour*
Cuisinière combinée (a)	5000 (17.9 %)	584	117	0.32
Réfrigérateur à dégivrage automatique (14 pi³) (b)	350 (350 %)	1063	3037	8.32
Téléviseur couleur (c)	300 (100 %)	387	1288	3.53
Lave-vaisselle (d)	-	-	204	0.56
Machine à laver (eau froid) (e)	800 (0.0 %)	79	99	0.27
Sèche-linge (f)	5000 (0.0 %)	870	174	0.47

Il est à rappeler que le pas de temps de calculs du logiciel DOE-2 est d'une heure et que cela a un impact important sur l'introduction des données relatives aux équipements qui fonctionnent en moyenne moins qu'une heure. Par exemple, la puissance minimale admise, de 121 Watts, mentionnées dans les horaires d'opération des équipements électriques (tableaux 4.12 à 4.15), est une puissance hypothétique d'un réfrigérateur correspondant à la consommation de ce réfrigérateur sur une période de 8760 heures. La chaleur dégagée par cette appareil est de 424 Watts (350% de la puissance) parce que nous avons admis que le coefficient de performance (COP) est de 2.5.

Les horaires d'opération et de dégagement de chaleur des équipements ménagers sont présentées dans les tableaux 4.12 à 4.15. Les indices (a), (b), (c) etc. mentionnés dans ces tableaux permettent d'identifier pour chaque période quels sont les équipements utilisés. Ces indices sont les mêmes que ceux dans le tableau 4.11. Pour composer ces horaires, nous nous sommes référés à la puissance des équipements et au nombre d'heures moyen d'opération par jour présentés dans le tableau 4.11.

Tableau 4.12 L'horaire d'opération et de dégagement de chaleur des équipements ménagers pour les jours de semaine *relative aux appartements* inoccupés.

Heures	*Puissance appelée [Watts]*	*Dégagement de chaleur [Watts]*
00h00 à 17h00	121 (b)	424
17h00 à 18h00	1721 (a) (b)	711
18h00 à 23h00	333 (b) (c)	636
23h00 à 24h00	121 (b)	303

La consommation électrique journalière des équipements pour le cas ci-dessus est de 5.56 kWh.

Tableau 4.13 L'horaire d'opération et de dégagement de chaleur des équipements ménagers pour les jours de semaine *relative aux appartements* occupés.

Heures	*Puissance appelée [Watts]*	*Dégagement de chaleur [Watts]*
00h00 à 9h00	121 (b)	424
09h00 à 16h00	333 (b) (c)	636
16h00 à 17h00	2683 (b) (c) (f)	636
17h00 à 18h00	1721 (a) (b)	711
18h00 à 23h00	333 (b) (c)	636
23h00 à 24h00	121 (b)	424

La consommation électrique journalière des équipements pour le cas ci-dessus est de 9.61 kWh.

Tableau 4.14 L'horaire d'opération et de dégagement de chaleur des équipements ménagers pour la fin de semaine *relative aux appartements* inoccupés

Heures	*Puissance appelée [Watts]*	*Dégagement de chaleur [Watts]*
00h00 à 10h00	121 (b)	424
10h00 à 15h00	333 (b) (c)	636
15h00 à 17h00	2683 (b) (c) (f)	636
17h00 à 18h00	1721 (a) (b)	711
18h00 à 23h00	333 (b) (c)	636
23h00 à 24h00	121 (b)	424

La consommation électrique journalière des équipements pour le cas ci-dessus est de 11.75 kWh.

Tableau 4.15 L'horaire d'opération et de dégagement de chaleur des équipements ménagers pour la fin de semaine *relative aux appartements* occupés

Heures	*Puissance appelée [Watts]*	*Dégagement de chaleur [Watts]*
00h00 à 10h00	121 (b)	424
10h00 à 17h00	333 (b) (c)	636
17h00 à 18h00	1721 (a) (b)	711
18h00 à 23h00	333 (b) (c)	636
23h00 à 24h00	121 (b)	424

La consommation électrique journalière des équipements pour le cas ci-dessus est de 7.05 kWh

Il est à noter que pour une semaine complète, la consommation admise est de 51.3 kWh pour les appartements *inoccupés* et de 62.15 kWh pour les appartement *occupés*.

4.4 Modélisation dans le logiciel DOE-2

La qualité de la base des données servant à l'apprentissage des réseaux de neurones est un facteur crucial pour la précision du futur Système d'Aide aux Estimations Énergétiques SAEE. Par conséquent, nous avons modélisé les appartements et les corridors dans le logiciel DOE-2 avec beaucoup de soins. Certaines particularités de nos modèles sont présentées ci-dessous :

- Pour tenir compte de l'infiltration, de l'orientation des murs extérieurs et de la localisation des appartements, le module d'intelligence artificielle (figure 4.1) comportera 8 modèles d'appartement (4 situés aux coins et 4 pour les orientations principales) par étage type. Les étages types sont les suivants : le rez-de-chaussée, l'étage au niveau neutre du point de vue de l'effet de cheminé et le dernier étage sans et avec toiture. L'infiltration due à l'effet de cheminé pour les autres étages sera considérée comme une fonction linéaire entre les valeurs obtenues pour trois étages types.
- Les modèles des appartements sont composés d'une seule zone incluant la salle à manger, la cuisine, le salon et les chambres. Cette hypothèse résulte d'une étude de sensibilité sur le zonage des bâtiments résidentiels ayant les profils d'occupation et d'utilisation des équipements semblables aux profils des appartements. Cette étude a démontré que le zonage plus détaillé a un impact négligeable sur la consommation d'énergie.

- Les variations de température intérieure d'appartement sont considérées comme faibles et par conséquence l'interaction thermique entre les appartements est négligeable ;
- Nous allons introduire au modèle du bâtiment dans le logiciel DOE-2 trois fonctions développées par notre équipe, pour une meilleure simulation du comportement thermique des appartements. Le modèle permettra la simulation des opérations spécifiques relatives aux contrôles : (1) de l'éclairage et des rideaux, (2) de l'ouverture des fenêtres et (3) de l'opération du système de ventilation des corridors. Ces contrôles, en plus d'être affectés par les scénarios d'occupation des appartements, seront pilotés par certains paramètres, comme par exemple :
  - le contrôle de l'éclairage et de l'utilisation des rideaux sera en fonction du niveau d'éclairement extérieur ;
  - le contrôle de l'ouverture des fenêtres sera en fonction des températures extérieure et intérieure.
- Les détails des fonctions mentionnées ci-dessus sont présentées dans le chapitre intitulé « Description des fonctions ».

4.4.1 Description des fonctions

Les trois fonctions développées et introduites au logiciel DOE-2 sont spécialement adaptées pour une meilleure simulation des tours d'habitation. Dans le module de calcul des charges (LOADS dans le logiciel DOE-2) les deux fonctions suivantes ont été conçues

- fonction intitulée SOLEIL.INP qui a pour but d'ajuster les ombrages intérieurs des fenêtres et la puissance d'éclairage selon l'ensoleillement
- fonction intitulée INFIL-1.INP qui a pour but de tenir compte de l'effet de la surpression créée par la ventilation des corridors sur l'infiltration de l'air dans les appartements.

Dans le module de calcul des systèmes (SYSTEMS dans le logiciel DOE-2) nous avons introduit une fonction INFIL-2.INP qui a pour but de tenir compte de l'impact de l'ouverture des fenêtres sur l'infiltration dans les appartements.

4.4.1.1 Fonction SOLEIL.INP

Cette fonction, tel que mentionné, permet d'ajuster l'ombrage et l'éclairage intérieures. En ce qui concerne l'ombrage c'est le coefficient d'ombre des rideaux (shading coefficient SC_a) qui est effectivement ajusté. Cet ajustement se fait de la façon suivante :

- si l'éclairement dans l'appartement est inférieur à 7432 lux, le coefficient d'ombre des rideaux SC_R est égal à 1 (les rideaux sont ouverts)
- si l'éclairement dans l'appartement est supérieur à 7432 lux, le coefficient d'ombre SC_R est ajusté afin que le coefficient d'ombre de l'ensemble *fenêtre - rideaux* (shading coefficient SC) soit égal à 0.5 (SC = 0.5). Pour y arriver, le coefficient d'ombre des rideaux (SC_R) est donc de 0.5681 pour les fenêtres à simple vitrage et de 0.6666 pour les fenêtres à double vitrages.

Pour activer l'éclairage intérieur, le niveau de référence de l'éclairement dans l'appartement est de 148 lux. L'éclairage intérieur sera ouvert si l'éclairement est inférieur à 148 lux et il est fermé dans le cas contraire.

Pour réaliser les calculs, nous avons admis, selon les références, les valeurs suivantes : l'éclairement du rayonnement solaire directe 100 lumen/Watts et du rayonnement solaire diffus 125 lumen/Watts. L'organigramme de cette fonction est présenté sur la figure qui suit :

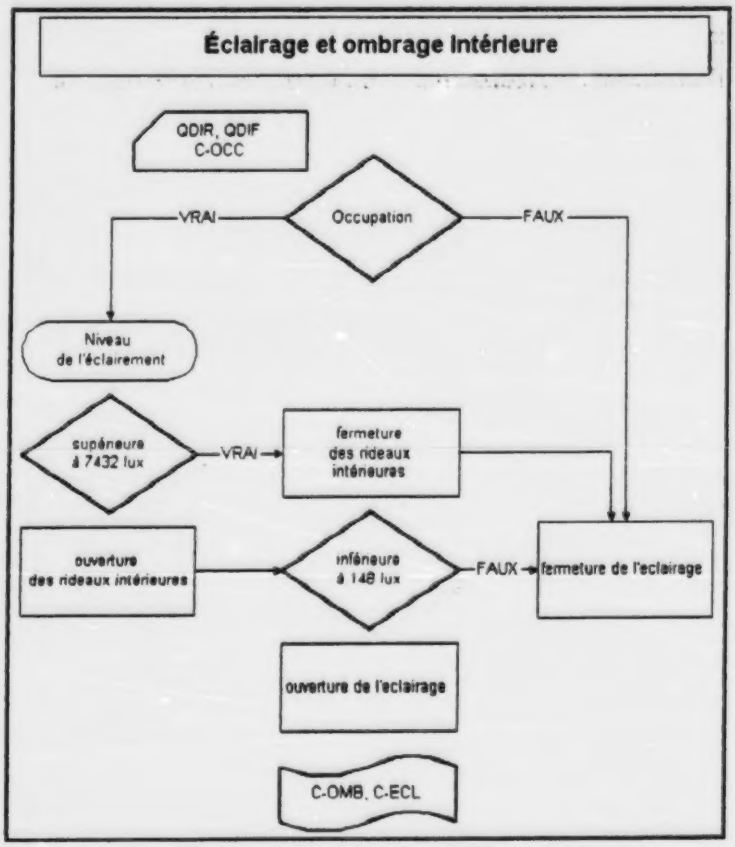


Figure 4.2 Organigramme de la fonction SOLEIL.INP

4.4.1.2 Fonction INFIL-1.INP

Tel que mentionné, cette fonction est conçue pour tenir compte de l'effet de la surpression créée par la ventilation des corridors sur l'infiltration dans les appartements. Cette surpression s'ajoute à la différence de pression due au vent et due à l'effet de cheminée calculée par le logiciel DOE-2 en fonction des données météorologiques et de nombre d'étages. La valeur de la surpression est de 0.5 à 4 Pa et elle est admise selon le rapport de SCHL intitulé « Development of design procedures and guidelines for reducing electric demand by air leakage control in high-rise residential buildings, *Final Report* » [11]. L'organigramme de cette fonction est présenté sur la figure qui suit :

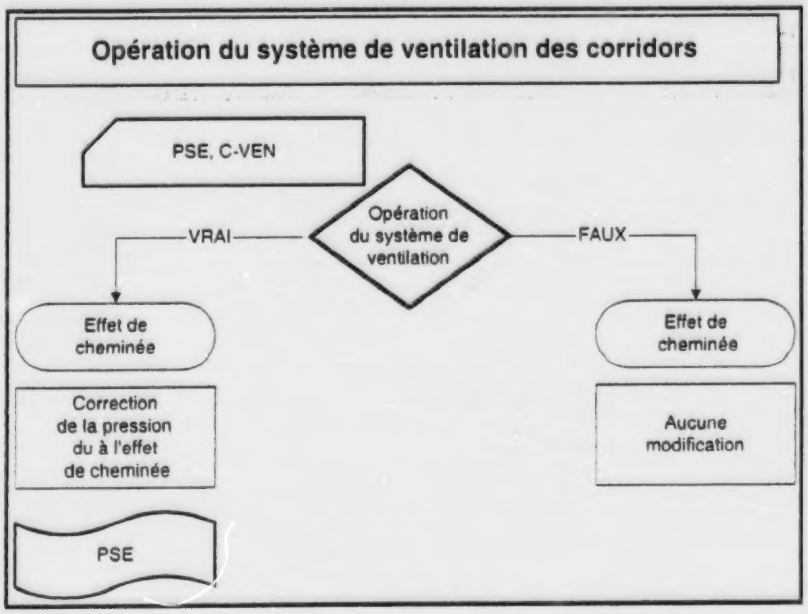


Figure 4.3 Organigramme de la fonction INFIL-1.INP

4.4.1.3 Fonction INFIL-2.INP

Cette fonction a pour but de tenir compte de l'impact de l'ouverture des fenêtres sur l'infiltration dans les appartements. On admet pour les simulations que la plage de contrôle de thermostat dans les appartements est de 3 °F. Par conséquence, la température intérieure en hiver est contrôlée par le thermostat entre 66.5 et 69.5 °F (la température de consigne étant de 68 °F). En été, si le refroidissement est disponible, ce contrôle s'effectue entre 73.5 à 76.5 °F (la température de consigne étant de 75 °F). Le contrôle de l'ouverture des fenêtres est réalisé de la façon suivante :

- les fenêtres sont ouvertes pour n'importe quelle température extérieure lorsque les occupants sont présents et la température intérieure est :
- supérieure à 69.5 °F pour les cas d'appartements chauffés mais non climatisés;
- entre 69.5 et 73.5 °F pour les cas d'appartements chauffés et climatisés (la note [1] sur le schéma ci-dessous);
- les fenêtres sont toujours fermées si les occupants sont absents ou la période est définie comme inactive et la température extérieure est inférieure à 10 °C (50 °F).

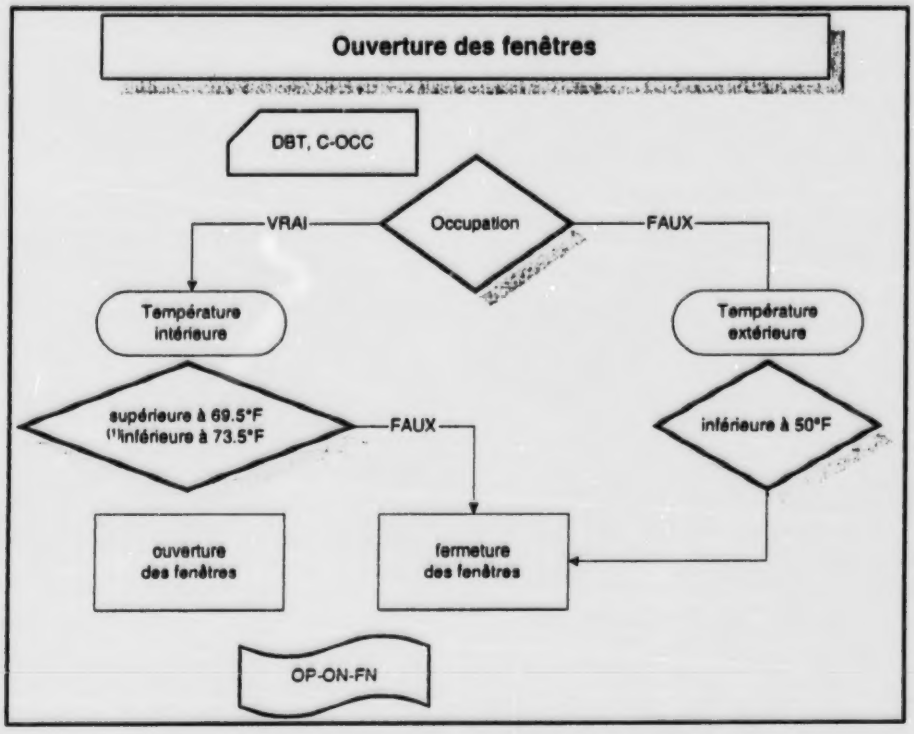


Figure 4.4 Organigramme de la fonction INFIL-2.INP

4.4.1.4 Tableaux des variables

Tableau 4.16 Les variables utilisées dans les fonctions

Variables	*Définition*
C-OCC	horaire d'occupation
C-OMB	horaire d'ombrage intérieure
C-ECL	horaire d'éclairage
OP-ON-FN	horaire d'ouverture des fenêtres
C-VEN	horaire de ventilation des corridors
QDIR	puissance d'ensoleillement directe [BTU/(h pi^2)]
QDIF	puissance d'ensoleillement diffuse [BTU/(h pi^2)]
DBT	température extérieure [°F]
PSE	pression du à l'effet de cheminée [po Hg]

4.5 Résultats du Système d'Aide aux Estimations Énergétiques (SAEE)

Les résultats visés par le SAEE sont les suivants :

1. électricité
   a) consommation totale annuelle du bâtiment en kWh ;
   b) consommation spécifique par appartement en kWh/m² pour chaque orientation
   c) puissance maximale appelée des équipements et de l'éclairage ;
   d) consommation des corridors en kWh ;
   e) consommation des garages souterrain ;
   f) consommation de l'eau chaude domestique.

La version du SAEE développé dans ce projet ne comporte que les points de *a* à *d*.

2. chauffage
   a) consommation totale annuelle du bâtiment en kWh ;
   b) consommation spécifique par appartement exprimée en kWh/m² par orientation et par étage (influence de l'infiltration due à l'effet de cheminée) ;
   c) appel de puissance maximale en kW ;
   d) consommation des corridors en kWh ;
   e) consommation des garages souterrains.

La version du SAEE développé dans ce projet ne comporte que les points de *a* à *d*.

3. refroidissement (s'il y a lieu)
   a) consommation totale annuelle du bâtiment en kWh
   b) consommation spécifique par appartement et par orientation exprimées en kWh/m²
   c) consommation des corridors en kWh

La version du SAEE développé dans ce projet comporte tout les points.

5. Validation des modèles DOE-2 utilisés pour créer la base de données

Pour valider les modèles DOE-2, nous avons fait une comparaison entre les résultats d'une étude portant sur le bilan des gains et des déperditions thermiques des bâtiments [7] et les résultats obtenus par les simulations en utilisant les modèles de DOE-2. Dans le document [7] intitulé « Energy audits of high-rise residential building, *Final Report* SCHL » on présente les analyses énergétiques de dix bâtiments basées sur les factures énergétiques de ces bâtiments. Pour les fins de comparaison nous avons choisi le bâtiment situé à Ottawa parce que, pour ce bâtiment nous avons trouvé les données architecturales supplémentaires dans le document [11] intitulé « Development of design procedures and guidelines for reducing electric demand by air leakage control in high-rise residential buildings ». Dans le texte qui suit nous faisons souvent référence à un autre document qui nous a servi à choisir les données par défaut pour les modèles DOE-2. Il s'agit du document [6] intitulé « Beta plan support services : commercial building profiles ».

5.1 Description du bâtiment étudié

Le bâtiment étudié est situé à Ottawa. Il est occupé par les personnes âgées. C'est un bâtiment de 21 étages comportant des 240 appartements. L'orientation principale est de l'est et l'ouest. Selon la description du bâtiment [11] sur l'étage type il y a de 8 appartements de 600 m^2 et de 4 appartements de 700 m^2. La superficie chauffée est de 14 290 m^2 (153 760 pi^2) repartie de la façon suivante : les appartements 12 105 m^2 (130 240 pi^2) et les corridors 2185 m^2 (23 520 pi^2). Le schéma du bâtiment présenté dans le document [11] est reproduit ci-dessous. Le résumé sur les paramètres du bâtiments relevés des documents [11] et [7] et sur ceux utilisés dans les simulations à l'aide du logiciel DOE-2 est présenté dans le tableau 5.1. On peut constater que dans certains cas ces paramètres n'ont pas les mêmes valeurs. L'explication portant sur ces différences est comme suit :

> Le SAEE contient les modules d'intelligence artificielle basés sur les résultats des simulations énergétiques des bâtiments réalisées à l'aide du logiciel DOE-2. Les paramètres par défaut et les valeurs discrètes des paramètres variables qui sont utilisées dans ces simulations ont été discutés dans le chapitre précédant. On a signalé aussi que les valeurs discrètes des paramètres variables utilisées dans ces simulations sont les mêmes que les valeurs disponibles dans l'interface du Système SAEE conçu dans ce projet. Il en résulte que dans notre étude de comparaison au lieu d'utiliser les valeurs exactes de certains paramètres de simulation nous devons utiliser les valeurs discrètes mentionnées ci-dessus. Par exemple : la résistance de mur extérieur du bâtiment étudié est de RSI 1.720 tandis que la valeur discrète utilisée dans les simulations est de RSI 1.761.

Tableau 5.1 Résumé des données portant sur le bâtiment étudié

Description des paramètres	*Relevés des documents [7] et [11]*	*Utilisés dans les simulation à l'aide du logiciel DOE2*
nombre d'étage	21	21
hauteur des étages	2.65 m	2.74 m (par défaut)
type de système de chauffage	électrique	(besoins)
superficie des appartements (orientation simple l'est ou l'ouest)	600 pi^2	600 pi^2
superficie des appartements de coins (orientation double)	700 pi^2	700 pi^2
ratio longueur/largeur des appartements	1.0	1.0
infiltration	2.51 L/sm^2 à 75 Pa	3.0 L/sm^2 à 75 Pa
résistance thermique des murs	1.720 RSI	1.761 RSI (R10)
résistance thermique de la toiture	2.250 RSI	2.113 RSI (R12)
résistance thermique du vitrage	0.330 RSI	0.317 RSI (R1.8)
superficie de vitrage (référence à la surface extérieure exposée)	25.6%	25%
superficie des corridors	23520 pi^2	23520 pi^2
ventilation (corridors)	0.535 CFM/pi^2	0.55 CFM/pi^2
heures d'opération (corridors)	7 heures	12 heures
éclairage (corridors)	0.46 W/pi^2	0.5 W/pi^2

Note : les fenêtres des appartements de coins (orientation double) sont exposées soit au nord soit au sud; les corridors ne sont pas climatisées; ils sont ventilés à 100% d'air frais

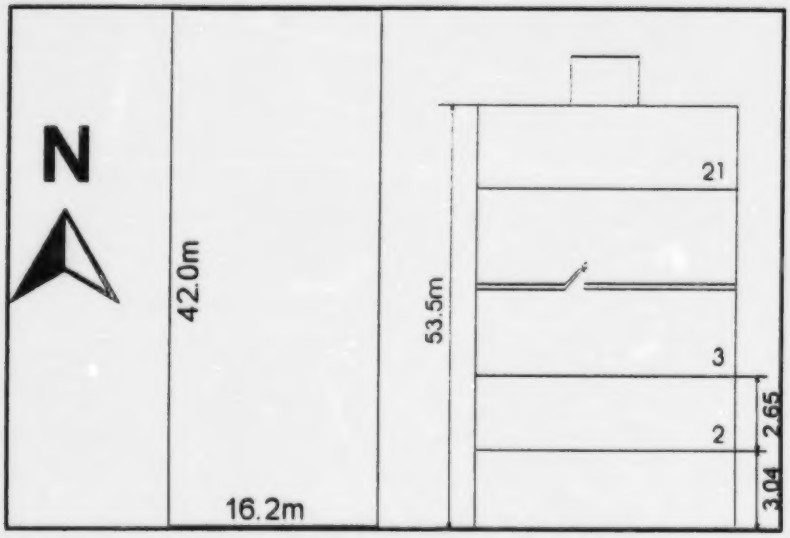


Figure 5.1 Schéma du bâtiment étudié

Dans le chapitre 4.3 nous avons présenté la description des horaires d'occupation et d'opération des équipements dans les bâtiments. Parmi ces horaires nous devons choisir l'horaire utilisée dans les simulations. Dans les documents [7] et [11] il n'y a aucune remarque sur les horaires d'occupation des appartements, mais étant donné qu'il s'agit d'un bâtiment occupé par les personnes âgées, l'horaire principale d'occupation du bâtiment que nous avons choisie pour la simulation est celle relative aux appartements *occupés*. Cependant, afin de déterminer l'impact des horaires d'occupation du bâtiment sur la consommation d'énergie, nous avons réalisé aussi les simulations avec l'autre horaire d'occupation, c'est-à-dire, avec l'horaire relative aux appartements *inoccupés*.

5.2 Comparaison des résultats

L'analyse énergétique présentée dans le document [7] concerne la période entre le mois de septembre est le mois de mai, c'est pourquoi nous ne présentons que les résultats des simulations concernant cette période.

Il est à noter que la simulation à l'aide du logiciel DOE-2 se fait dans deux ou trois modules selon la complexité de bâtiment. Dans le premier module (LOAD) les calculs des charges sont réalisés en admettant que la température intérieure est toujours égale à la température de consigne. Dans le deuxième module (SYSTEMS), en partant des résultats du module LOAD, on fait les corrections en tenant compte de système de contrôle de chauffage et de climatisation ainsi que la variation de température intérieure qui en résulte. Nous mentionnons cela parce que les tableaux 5.2 et 5.3 contiennent les résultats tirés de ces deux modules. Les déperditions de chaleur (par murs, fenêtres, infiltration, etc.) et les gains de chaleur (dus à l'éclairage, l'ensoleillement et les

équipements) ne peuvent être déterminés qu'à partir du module LOAD, tandis que les consommations d'énergie (par l'éclairage, l'équipement, les ventilateurs et le chauffage) sont tirées du module SYSTEMS.

Il faut noter aussi que les gains de chaleur ne se produisent pas forcement aux mêmes moments que les déperditions de chaleur. Il en résulte qu'un simple bilan des gains et des déperditions de chaleur, présentés dans les tableaux de comparaison, n'est pas suffisant pour déterminer la consommation de chauffage. Cette consommation est tirée du module SYSTEMS et elle est présentée dans les tableaux 5.2 et 5.3.

Le tableau 5.4 contient les résultats de simulations et les résultats de l'analyse énergétique présentés dans le document [7].

*Tableau 5.2 Résultats de simulation avec l'horaire d'occupation n° 2 (*appartements occupés*)*

	APPARTEMENTS							CORRIDORS	BÂTIMENT
	par orientation						Total	Total	Total
	E	O	Coin NO	Coin NE	Coin SO	Coin SE			
CONSOMMATION ÉLECTRIQUE DE BASE (kWh)									
Éclairage	36255.63	33869.32	10463.83	10463.83	10155.38	10155.38	**111363.36**	77077.81	**188441.17**
Équipements	202889.73	202889.73	50722.43	50722.43	50722.43	50722.43	**608669.18**	0.00	**608669.18**
Ventilateurs	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.00**	24876.08	**24876.08**
TOTAL	**239145.36**	**236759.04**	**61186.26**	**61186.26**	**60877.81**	**60877.81**	**720032.54**	**101953.89**	**821986.43**
DÉPERDITIONS DE CHALEUR (kWh)									
Murs	75905.42	77681.98	50996.62	50356.99	45955.16	45315.52	**346211.70**	0.00	**346211.70**
Toiture	13531.03	13531.03	3946.55	3946.55	3946.55	3946.55	**42848.27**	0.00	**42848.27**
Fenêtres	150177.55	153765.57	39050.95	39059.16	35883.23	36284.67	**454221.13**	0.00	**454221.13**
Infiltration	98288.76	98288.76	79327.06	79327.06	61490.85	61490.85	**478213.34**	0.00	**478213.34**
Ventilation	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.00**	442064.06	**442064.06**
TOTAL	**337902.76**	**343267.35**	**173321.18**	**172689.76**	**147275.79**	**147037.59**	**1321494.44**	**442064.06**	**1763558.50**
GAINS DE CHALEUR DUS : (kWh) :									
à l'éclairage	36263.69	33877.37	10466.18	10466.18	10157.73	10157.73	**111388.87**	77077.81	**188466.68**
aux équip.	301785.60	301785.60	75446.40	75446.40	75446.40	75446.40	**905356.79**	0.00	**905356.79**
à l'ensoleill.	129431.10	114422.25	15714.54	15613.03	51518.48	46264.38	**372963.77**	0.00	**372963.77**
TOTAL	**467480.38**	**450085.22**	**101627.12**	**101525.61**	**137122.60**	**131868.50**	**1389709.43**	**77077.81**	**1466787.24**
CONSOMMATION DE CHAUFFGE (kWh)									
Chauffage	**73274.98**	**78659.25**	81021.95	**80690.68**	**54377.87**	**56414.62**	**424439.35**	**357419.29**	**781858.64**
CONSOMMATION TOTALE (kWh)									
TOTAL ELEC	**312420.34**	**315418.29**	**142208.22**	**141876.94**	**115255.68**	**117292.42**	**1144471.89**	**459373.18**	**1603845.07**

Tableau 5.3 Résultats de simulation avec l'horaire d'occupation n° 1 (appartements inoccupés)

	APPARTEMENTS							CORRIDORS	BÂTIMENT
	par orientation						Total	Total	Total
	E	O	Coin NO	Coin NE	Coin SO	Coin SE			
CONSOMMATION ÉLECTRIQUE DE BASE (kWh)									
Éclairage	39346.99	37475.90	11468.30	11468.30	11175.66	11175.66	**122110.80**	77077.81	**199188.61**
Équipements	176420.36	176420.36	44105.09	44105.09	44105.09	44105.09	**529261.07**	0.00	**529261.07**
Ventilateurs	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.00**	24876.08	**24876.08**
TOTAL	**215767.35**	**213896.26**	**55573.39**	**55573.39**	**55280.75**	**55280.75**	**651371.87**	**101953.89**	**753325.76**
DÉPERDITIONS DE CHALEUR (kWh)									
Murs	75905.42	77681.98	50996.62	50356.99	45955.16	45315.52	**346211.70**	0.00	**346211.70**
Toiture	13531.03	13531.03	3946.55	3946.55	3946.55	3946.55	**42848.27**	0.00	**42848.27**
Fenêtres	149912.19	153647.50	39052.27	39063.73	35966.52	36101.61	**453743.82**	0.00	**453743.82**
Infiltration	98288.76	98288.76	79327.06	79327.06	61490.85	61490.85	**478213.34**	0.00	**478213.34**
Ventilation	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	**0.00**	442064.06	**442064.06**
TOTAL	**337637.40**	**343149.28**	**173322.50**	**172694.33**	**147359.08**	**146854.54**	**1321017.13**	**442064.06**	**1763081.19**
GAINS DE CHALEUR DUS : (kWh) :									
à l'éclairage	39355.04	37483.96	11470.65	11470.65	11178.01	11178.01	**122136.30**	77077.81	**199214.11**
aux équip.	272033.93	272033.93	68008.48	68008.48	68008.48	68008.48	**816101.78**	0.00	**816101.78**
à l'ensoleill.	133595.76	116160.00	15685.54	15541.61	50173.56	48445.54	**379602.01**	0.00	**379602.01**
TOTAL	**444984.73**	**425677.88**	**95164.67**	**95020.74**	**129360.05**	**127632.03**	**1317840.09**	**77077.81**	**1394917.90**
CONSOMMATION DE CHAUFFGE (kWh)									
Chauffage	**76120.24**	**82756.82**	**84480.60**	**84087.56**	**55948.27**	**56416.72**	**439810.20**	**357419.29**	**797229.49**
CONSOMMATION TOTALE (kWh)									
TOTAL ELEC	**291887.59**	**296653.08**	**140053.99**	**139660.94**	**111229.02**	**111697.46**	**1091182.07**	**459373.18**	**1550555.25**

Tel qu'il a été déjà mentionné, les consommations d'énergie du système d'eau chaude domestique, d'ascenseurs et des buanderies seront déterminées dans les modules statistiques du SAEE. Par conséquence, ces consommations ne sont pas déterminées dans les simulations à l'aide du logiciel DOE-2 et les résultats des simulations présentés ci-dessus ne les contiennent pas.

Tableau 5.4 Consommation totale d'énergie et consommation de chauffage dans le bâtiment étudié (eau chaude, ascenseurs et buanderie exclus)

Consommation d'énergie [kWh]	Document [3] (1993/1994)	Simulation DOE-2 (scénario n° 1)	Simulation DOE-2 (scénario n° 2)
Totale	1 683 140 *(facturée)*	1 550 555	1 603 845
Chauffage	994 818 *(estimée)*	797 229	781 859

Le scénario d'occupation n° 2 (*appartements occupés*) correspond mieux aux occupants de ce bâtiment. La différence entre la consommation obtenue par la simulation avec ce scénario et celle facturée en 1993/1994 est de 79 295 kWh ce qui représente 4.7% de la consommation facturée. Il faut noter que les simulations ont été réalisées en utilisant le fichier météorologique d'Ottawa pour l'année moyenne sur 30 ans, tandis que la facturation concerne l'année 1993/1994 ce qui peut entièrement expliquer cette différence.

Les différences sont plus importantes au niveau de la consommation d'énergie par le chauffage. Il faut noter que cette consommation n'est pas facturée et dans le document [7] elle provient d'une estimation. Pour expliquer cette différence on présente dans l'annexe A une analyse des résultats des simulations et des estimations du document [7] concernant des composantes de la consommation totale, des déperditions et des gains de chaleur du bâtiment.

6. Réseaux de neurones

Dans le cadre du système d'aide SAEE développé pour les bâtiments à habitation, nous avons utilisé 27 réseaux de neurones. Trois réseaux de neurones pour l'estimation de la consommation d'énergie des corridors et 24 réseaux pour l'estimation de la consommation d'énergie des appartements.

Les meilleurs résultats d'apprentissage ont été obtenus en utilisant des réseaux composés d'une seule couche de neurones (*plus une couche cachée*) avec un nombre de neurones, dans la couche d'entrées, deux fois supérieures au nombre de paramètres d'entrées. Dans la couche d'entrée, les fonctions d'activation utilisées sont de type *tangente hyperbolique* et dans la couche cachée, de type *linéaire*. L'approche utilisé, pour la rétropropagation de l'erreur, est la méthode de *Levenberg-Marquart*.

6.1 Estimation de la consommation d'énergie des corridors

Les trois réseaux ont été structurés pour déterminer respectivement les consommations des usages suivants:

- les utilitaires (l'éclairage et les ventilateurs) ;
- le chauffage ;
- la climatisation.

Les paramètres d'entrées des réseaux pour l'estimation des consommations mentionnées ci-dessus sont les suivants :

1. la puissance surfacique d'éclairage ;
2. le taux de ventilation ;
3. la période d'opération des ventilateurs de corridors.

6.2 Estimation de la consommation d'énergie des appartements

Les réseaux de neurones (24) ont été structurés pour déterminer, par orientation, les consommations des usages suivants :

- les utilitaires (l'éclairage et les appareils électroménagers) ;
- le chauffage ;
- la climatisation.

Les paramètres d'entrées des réseaux pour l'estimation des consommations des utilitaires dans les appartements sont les suivants :

1. surface de plancher ;
2. ratio longueur/largeur ;
3. ratio de vitrage ;
4. horaire d'occupation.

Les paramètres d'entrées des réseaux pour estimer la consommation de chauffage des appartements à une seule orientation (*Nord, Sud, Est, Ouest*) sont les suivants :

1. surface de plancher ;
2. ratio longueur/largeur ;
3. nombre d'étages ;
4. résistance des murs extérieurs ;
5. résistance de la toiture ;
6. résistance du vitrage ;
7. ratio de vitrage ;
8. infiltration surfacique ;
9. profil d'occupation ;
10. période d'opération des ventilateurs de corridors.

Les paramètres d'entrées des réseaux pour estimer la consommation de chauffage des appartements de coins (*Nord-Est, Nors-Ouest, Sud-Est, Sud-Ouest*) sont les suivants :

1. surface de plancher ;
2. ratio longueur/largeur ;
3. nombre d'étages ;
4. résistance des murs extérieurs ;
5. résistance de la toiture ;
6. résistance du vitrage ;
7. ratio de vitrage (orientation Nord et Sud) ;
8. ratio de vitrage (orientation Est et Ouest) ;
9. infiltration surfacique ;
10. profil d'occupation ;
11. période d'opération des ventilateurs de corridors.

Les paramètres d'entrées des réseaux pour estimer la consommation de climatisation sont identiques à ceux mentionnés pour estimer la consommation de chauffage.

Les paramètres de sorties de données des réseaux de neurones pour estimer les consommations de chauffage et de climatisation des appartements sont les suivants :

1. consommations d'énergie des appartements du premier étage ;
2. consommations d'énergie des appartements de l'étage du milieu ;
3. consommations d'énergie des appartements du dernier étage sans toiture ;
4. consommations d'énergie des appartements du dernier étage avec toiture.

Cette structure de sorties de données a été nécessaire pour tenir compte de l'infiltration en fonction du nombre d'étages (*effet de cheminée*).

6.3 Estimation de la puissance maximale de chauffage des appartements

Les réseaux de neurones (4) ont été structurés pour déterminer les puissances maximales de chauffage pour les appartements du premier étage et de l'étage du milieu, pour les appartements à simple et à double orientation.

Les paramètres d'entrées pour l'estimation de la puissance maximale de chauffage des appartements sont les mêmes que ceux présentés pour l'estimation de la consommation avec certaines modifications. Notamment, on a ajouté l'orientation d'appartements et on a enlevé les paramètres suivantes :

- résistance de la toiture ;
- profil d'occupation ;
- période d'opération des ventilateurs de corridors.

6.4 Apprentissage des réseaux de neurones

Pour l'apprentissage des réseaux de neurones, nous avons créé, à l'aide du logiciel *DOE-2*, une base de données de 500 à 841 simulations. La validation de l'apprentissage des réseaux de neurones, a été réalisée sur une base de données comportant les résultats des 200 simulations. Cette base de données est indépendante de la base utilisée pour l'apprentissage. Les résultats de l'analyse statistique pour valider l'apprentissage des réseaux des réseaux de neurones pour l'estimation de la consommation d'énergie et la puissance de chauffage sont présentés respectivement dans les tableau 6.1 et 6.3.

Tableau 6.1 Résultats d'apprentissage des réseaux de neurones

		Consommation d'électricité de base		*Consommation d'électricité de chauffage*		*Consommation d'électricité de refroidissement*	
Étage	*orientation*	*CV [%]*	*EC [kWh]*	*CV [%]*	*EC [kWh]*	*CV [%]*	*EC [kWh]*
Premier étage	*nord*	0.49	19.59	1.95	219.16	1.12	8.11
	sud	0.55	22.07	1.83	166.26	1.42	14.06
	est	0.51	20.25	1.50	158.14	1.59	16.71
	ouest	0.39	15.27	1.17	134.71	1.33	13.61
	nord-est	0.83	33.54	2.85	592.99	3.03	29.62
	nord-ouest	1.05	42.14	2.21	475.98	2.99	28.54
	sud-est	0.71	28.78	2.05	389.33	2.19	25.67
	sud-ouest	0.77	30.72	2.89	570.85	1.96	22.58
Étage du milieu	*nord*	même résultats que pour le premier étage	même résultats que pour le premier étage	3.08	29.14	0.81	7.11
	sud			6.10	16.74	0.85	9.82
	est			3.32	26.26	0.93	11.33
	ouest			2.35	43.73	1.00	11.99
	nord-est			3.75	82.38	1.46	17.30
	nord-ouest			2.83	87.68	1.70	19.84
	sud-est			4.11	55.01	1.50	20.91
	sud-ouest			3.21	67.60	1.39	19.17
Dernier Étage Sans Toit	*nord*	même résultats que pour le premier étage	même résultats que pour le premier étage	3.88	26.49	0.79	7.21
	sud			7.94	12.23	0.93	11.13
	est			5.41	23.64	0.96	12.04
	ouest			4.80	25.31	1.04	12.96
	nord-est			4.95	78.04	1.57	19.30
	nord-ouest			4.81	80.35	1.89	23.12
	sud-est			5.88	50.09	1.69	24.16
	sud-ouest			5.58	50.34	1.42	20.19
Dernier Étage Avec Toit	*nord*	même résultats que pour le premier étage	même résultats que pour le premier étage	1.33	53.99	0.93	6.90
	sud			2.44	56.35	1.04	10.59
	est			1.79	59.94	0.98	10.56
	ouest			1.69	59.01	1.15	12.19
	nord-est			1.97	105.44	1.78	19.00
	nord-ouest			2.15	117.43	1.91	20.30
	sud-est			2.78	107.86	2.04	26.00
	sud-ouest			2.43	96.47	1.89	23.88

L'analyse des résultats permet de constater que les coefficients de variation sont très faibles, sauf pour les appartements orientés au sud situés à l'étage du milieu et au dernier étage sans toiture (*en particulier pour le chauffage*). Cela s'explique par les grandeurs des résultats de simulations obtenues. Pour ces appartements, la consommation d'énergie pour le chauffage sera, dans certains cas, pratiquement nulle en raison des gains d'ensoleillement, des gains internes et de l'effet de cheminé. Un exemple de résultats, pour la consommation d'énergie de chauffage des appartements du dernier étage sans toiture dont la surface extérieure est orientée au sud, est présenté dans le tableau 6.2. Les coefficients de variation CV et les écarts types EC sont présentés pour quatre tranches de consommation d'énergie. On peut constater que le CV est très élevé (presque 10%) pour les valeurs de consommation situées entre 0 et 550 kWh, et que le nombre de simulations dans cette tranche est de 152 sur 200. L'écart type, par contre, pour la même tranche est de 11.74 kWh qui correspond au coût annuel, tout à fait négligeable, de 1 dollar. Pour les autres tranches de consommation d'énergie (de 550 à 2200 kWh) les CV sont très faibles de 1.83 et 0.69%. Les exemples pour les autres appartements ne sont pas cités ici mais la tendance est tout à fait semblable. Il en résulte que pour les appartements dont la consommation d'énergie est faible, le CV peut être relativement élevé même si l'écart type est très faible (parfois presque négligeable).

Tableau 6.2 Répartition des résultats de l'analyse par tranches de consommation

Chauffage appartement du dernier étage sans toiture (orientation sud)	
Entre 0 et 550 kWh :	152/200
moyenne :	115.8699 kWh
écart type :	11.7425 kWh
coefficient de variation :	0.10134
Entre 550 et 1100 kWh :	12/200
moyenne :	771.548 kWh
écart type :	11.9326 kWh
coefficient de variation :	0.018381
Entre 1100 et 1650 kWh :	1/200
moyenne :	1141.026 kWh
écart type :	7.8818 kWh
coefficient de variation :	0.0069076
Entre 1650 et 2200 kWh :	1/200
moyenne :	1656.985 kWh
écart type :	21.1243 kWh
coefficient de variation :	0.012749

L'apprentissage des réseaux pour l'estimation de la puissance maximale de chauffage a été réalisé en éliminant les résultats des simulations dont la puissance est égale à zéro. L'estimation de la puissance de chauffage des autres étages sera déterminé à l'aide des estimations des étages ci-dessous et des équations heuristiques. Le paragraphe 7.3.1. porte sur cette problématique et sur le calcul de la puissance de chauffage et des équipements ménagers et de l'éclairage.

Tableau 6.3 Résultats d'apprentissage des réseaux de neurones

		Puissance maximale électrique de chauffage	
Étage	*Surface*	*CV [%]*	*EC [kW]*
Premier	*simple*	5.12	0.515
	double	4.31	0.658
Milieu	*simple*	6.63	0.308
	double	6.33	0.356

7. Formules utilisées

7.1 Analyse statistique

Dans les sections précédantes l'écart type (*EC*) et le coefficient de variation (*CV*) ont été introduits pour comparer les résultats de simulation (*d*) avec les résultats d'estimation (*o*). Les formules associées à ces définitions sont les suivantes.

$$EC = \sqrt{\sum_{P=1}^{P} \frac{(d_p - o_p)^2}{P}} \qquad CV = \frac{EC}{\overline{d_p}}$$

Dans les équations, la valeur symbolique (*P*) défini le nombre d'éléments.

L'écart type utilisé diffère des représentations que l'on retrouve dans la littérature traitant des statistiques. Il est calculé sur une dispersion de l'erreur entre les valeurs estimées et les valeurs de référence (*résultats de simulation*), et non sur la moyenne de ces dernières. Cette représentation reconnue par les utilisateurs est généralement utilisée dans l'analyse des bases de données quand la valeur de référence (*d*) n'est pas ponctuelle.

Pour le coefficient de variation, tout comme pour l'écart type, nous pouvons noter une déviation par rapport à l'équation que l'on retrouve dans la littérature. Le dénominateur est la moyenne des valeurs de référence.

7.2 Formules utilisées pour l'estimation des puissances

Dans le cadre de l'estimation de la puissance de base et de chauffage des appartements et des corridors plusieurs formules ont été utilisées.

Pour estimer la puissance de base (P_B) des appartements nous avons utilisé la formule suivante :

$$P_B = \left[2.66 + \frac{110}{19 \times 10.764 \times 1000} \times (A - 500) \right]$$

Où **2.66** est la puissance maximale moyenne [kW] des équipements et de l'éclairage pour un appartement de **500** pieds carrés avec un éclairage incandescent, **19** est le rendement d'éclairage [lumen/W] d'un système d'éclairage incandescent, **110** est l'éclairement [lumen/pi^2] de référence et, **10.764** et **1000** des facteurs de conversion respectivement [m^2/pi^2] et [kW/W]. La formule permet de corriger la puissance d'éclairage en fonction de la surface de référence (***500 pieds carrés***).

Pour estimer la puissance maximum de chauffage des appartements du dernier étage sans toiture (P_{c3}), nous avons admis que la répartition de la puissance par étage est linéaire et nous avons utilisé la formule suivante :

$$P_{C3} = \max(P_{C2} - [P_{C1} - P_{C2}]0)$$

Où P_{c1} est la puissance maximale de chauffage du premier étage et P_{c2} la puissance de chauffage maximale de l'étage du milieu. La fonction **max** permet d'éliminer les résultats négatifs.

Pour estimer la puissance maximale de chauffage du dernier étage (P_{c4}), nous avons utilisé l'estimation de la puissance de chauffage P_{c3} et ajouté la perte maximale par conduction de la toiture.

$$P_{C4} = P_{C3} + \frac{1}{R_T} \times A \times \frac{[68 - (-11)]}{3412.14}$$

Où **–11** est la température extérieure [°F] de design, **68** est la température intérieure [°F] de design en chauffage, R_T est la résistance thermique de la toiture et **3412.14** le facteur de conversion [kW/BTU].

Pour estimer la puissance de base des corridors, nous avons utilisé la formule suivante :

$$P_B = \frac{(ecl \times A)}{1000} + q \times A \times 0.000587$$

Où **ecl** est la puissance surfacique [W/pi^2] de l'éclairage dans les corridors, **q** le débit surfacique [PCM/pi^2] dans les corridors et **0.000587** une constante [kW/PCM] qui tient compte de la puissance de ventilateurs.

Pour estimer la puissance de chauffage des corridors, nous avons utilisé la formule suivante :

$$P_B = 1.1 \times q \times A \times \frac{[68 - (-11)]}{3412.12}$$

7.3 Formules utilisées dans le module de sommation du SAEE

Dans la conception du système SAEE des bâtiments à habitation, le nombre d'étages intermédiaires et leur consommation d'énergie ont été déterminés par les concepteurs en tenant compte du nombre d'étages et des consommations d'énergie des étages types.

Pour définir le nombre d'étages intermédiaires situés entre le premier étage et l'étage du milieu (*nbint1*), nous avons utilisé la formule suivante :

$$\mathbf{nbint1} = \mathbf{ceil}\left(\{\mathbf{nb} - \mathbf{3}\}/\mathbf{2}\right)$$

Pour définir le nombre d'étages intermédiaires situés entre l'étage du milieu et le dernier étage (*nbint2*), nous avons utilisé la formule suivante :

$$\mathbf{nbint2} = \mathbf{floor}\left(\{\mathbf{nb} - \mathbf{3}\}/\mathbf{2}\right)$$

CEIL est un arrondissage des décimales d'un nombre pour le nombre entier supérieur et FLOOR est un arrondissage des décimales pour le nombre entier inférieur. Par exemple CEIL de 4.5 équivaut à 5 et FLOOR de 4.5 équivaut à 4. Ces arrondissages ont été nécessaires pour les édifices ayant un nombre d'étages pair. Dans les formules ci-dessus, le symbole (*nb*) signifie le nombre d'étage de l'édifice.

Pour évaluer la consommation de chauffage et de climatisation des étages intermédiaires, nous avons utilisé, pour les appartements situés entre le premier étage et l'étage du milieu, la consommation moyenne estimée pour ces deux étages. De même, pour les appartements situés entre l'étage du milieu et le dernier étage, sauf que la consommation moyenne a été estimée pour l'étage du milieu et le dernier étage sans toiture.

7.3.1. Hypothèses sur les puissances maximales de chauffage et de base du bâtiment

Pour déterminer la puissance appelée du bâtiment nous avons du d'abord évaluer la puissance maximale de chauffage des appartements située entre les étages spécifiques: le premier étage, l'étage du milieu et le dernier étage. Nous avons utilisé la même procédure que celle mentionnées ci-dessus pour la consommation d'énergie. Par la suite nous avons calculé la puissance maximale de chauffage du bâtiment comme étant la somme des puissances maximales de chauffage déterminées pour chaque appartement. Nous avons donc déterminé cette puissance en faisant l'hypothèse que les puissances maximales de chauffage se produisent au même moment dans tous les appartements. Il est absolument à souligner que ce le pire scénario qui peut se produire et que la puissance maximale réelle sera, selon tous vraisemblance, un peu plus faible que celle présentée dans le SAEE. La même hypothèse a été prise pour déterminer la puissance maximale de base (appelée dans SAEE *utilitaire éclairage*), même si l'on sait que l'utilisation des équipements ménagers dans les appartements est très aléatoire. Pour les fins des simulations nous avons basé l'utilisation de ces équipements sur le nombre moyen d'heure opération par jour (tableau 4.11), mais pour déterminer la puissance appelée il faut admettre certaines hypothèses sur la probabilité de l'utilisation simultanée de ces équipements ce qui n'était pas notre mandat. On laisse au future utilisateur du

SAEE de juger quelle pourra être la puissance *utilitaire éclairage* par rapport à la puissance maximale présentée dans le SAEE.

8. Validations des modules d'intelligence artificielle

La validation présentée dans le chapitre 5 consiste à comparer les consommations facturées d'un bâtiment à Ottawa et les résultats des simulations à l'aide du logiciel DOE-2 en utilisant les modèles DOE-2 des appartements et des corridors. Ces modèles ainsi validés ont servi à créer les bases de données utilisées dans l'apprentissage des réseaux de neurones. La validation présentée dans ce chapitre est semblable à celle du chapitre 5, mais les modèles DOE-2 des appartements et des corridors sont remplacés par les résultats d'apprentissage des réseaux de neurones. Si on fait la référence à la figure 4.1 on peut constater qu'il s'agit de la validation des modules d'intelligence artificielle. Les paramètres d'entrée variables sont évidemment les mêmes que ceux présentés dans le tableau 5.1. Les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux 8.1 à 8.3.

Tableau 8.1 Résultats obtenus par les réseaux de neurones avec l'horaire d'occupation n° 2 (appartements occupés)

	Consommations annuelles [kWh]			
	Électricité de base	Chauffage	Refroidissement	Totale
Appartements				
Est	320628.84	86281.46	82951.48	489861.78
Ouest	320270.16	100704.86	83019.50	503994.52
Nord-ouest	82936.35	92665.56	15339.55	190941.45
Nord-est	82253.43	83546.10	15943.42	181742.94
Sud-ouest	82914.09	67357.13	20073.95	170345.17
Sud-est	82588.59	61615.40	19976.52	164180.51
Totale	971591.46	492170.50	237304.41	1701066.37
Corridors	135650.40	359648.41	8080.51	503379.32
Totale du bâtiments	1107241.86	851818.91	245384.92	2204445.69

*Tableau 8.2 Résultats obtenus par les réseaux de neurones avec l'horaire d'occupation n° 1 (*appartements inoccupés*)*

	Consommations annuelles [kWh]			
	Électricité de base	Chauffage	Refroidissement	Totale
Appartements				
Est	276850.56	90122.24	79250.68	446223.48
Ouest	277424.28	103783.08	79160.84	460368.20
Nord-ouest	72026.22	94997.07	14536.24	181559.53
Nord-est	71671.11	86786.80	14828.65	173286.55
Sud-ouest	72331.35	67615.37	19138.16	159084.88
Sud-est	72112.53	62984.62	19007.07	154104.21
Totale	842416.05	506289.17	225921.63	1574626.85
Corridors	135650.40	359648.41	8080.51	503379.32
Totale du bâtiments	978066.45	865937.58	234002.13	2078006.17

La consommation d'électricité totale du bâtiment facturée est de 1 683 140 kWh. Elle ne tient pas en compte de l'électricité de refroidissement. À la consommation totale d'électricité du bâtiment simulée par les réseaux de neurones, il faut donc enlever la consommation d'électricité de refroidissement et un quart de la consommation d'électricité de base car le bâtiment est facturé entre les mois de septembre et de mai. Pour l'horaire n°1, par exemple, on obtient la consommation totale suivante: 2 078 006 – 234002 - 0.25*978 066 = 1 599 487 kWh. L'erreur absolue commise entre les deux consommations est donc de:1 683 140 –1 599 487 = 83 653 kWh. Ceci représente une erreur relative de: 83 653 / 1 683 140 = 5%.

Tableau 8.3 Consommations totales d'énergie dans le bâtiment étudié (eau chaude, ascenseurs et buanderie exclus)

Tirée du document [3]	**Estimée à partir des résultats obtenue par réseaux de neurones**	
Facturée du septembre 1993 au mai 1994	Horaire d'occupation n° 1	Horaire d'occupation n° 2
1 683 140 kWh	**1 559 487 kWh**	**1 682 251 kWh**

8.1 Conclusion

La différence entre les résultats obtenus par les modules d'intelligence artificielle du SAEE et les consommations facturées est de 5% pour l'horaire d'occupation n°1 (*appartements inoccupés*) et elle est nulle pour l'horaire n°2 (*appartements occupés*). Il est à rappeler que l'horaire n°2 correspond davantage aux occupants du bâtiment étudié. On peut en conclure que la précision des modules d'intelligence artificielle utilisés dans le SAEE est très satisfaisante.

Tel que mentionné dans le chapitre 5 on a choisi pour la validation le bâtiment d'Ottawa parce que la documentation sur ce bâtiment était la plus complète par rapport aux autres bâtiments présentés dans les documents de la SCHL. Il est à souligner que les résultats très concluants de la comparaison présentés ci-dessus sont obtenus, entre autres, grâce à une bonne précision des données contenues dans la documentation sur ce bâtiment. Ces données résultent d'une étude détaillée portant sur les caractéristiques thermiques et sur l'infiltration dans ce bâtiment. Il n'arrive pas très souvent d'avoir à disposition les données tellement détaillées et précises sur les bâtiments existants. Il sera donc tout à fait normal que pour un autre bâtiment existant la différence entre les résultats du SAEE et les consommations facturées sera beaucoup plus importante. Cependant, il ne faut jamais oublier que le SAEE n'est qu'un outil d'estimation et son rôle n'est pas de remplacer les logiciel de simulation détaillée tel que DOE-2.

9. Interfaces du système SAEE

Pour l'estimation de l'utilisation d'énergie des bâtiments à habitation, nous avons conçu trois principales interfaces utilisateurs. Ces interfaces sont accessibles avec le logiciel *MATLAB* et leur utilité est la suivante :

- une interface pour l'introduction des paramètres et le calcul des résultats (*schl.m*) ;
- une interface pour la récupération des résultats d'une précédante analyse (*schlres.m*) ;
- une interface pour la récupération et la comparaison des résultats des précédantes analyses (*schlcomp.m*).

Les détails techniques des paramètres d'entrée et des options sont présentés dans le rapport.

9.1 Interface pour l'introduction des paramètres et le calcul des résultats

Pour lancer cette interface, il s'agit en ligne de commande de *MATLAB* de taper le mot « schl ». L'interface pour l'introduction des paramètres est composée d'un menu principal (*SCHL édifice à appartements*) (*figure 9.1*). Dans cette fenêtre de dialogue, on retrouve plusieurs niveaux d'intervention présentés sous la rubrique *SELECTION*. Une rubrique *INFORMATIONS* associée au niveau d'intervention sélectionné nous indique les étapes à réaliser et les principales informations liées à ces dernières. Cette fenêtre ne doit pas être fermée avant d'avoir introduit l'ensemble des paramètres obligatoires et avant d'avoir lancé la procédure de calculs.

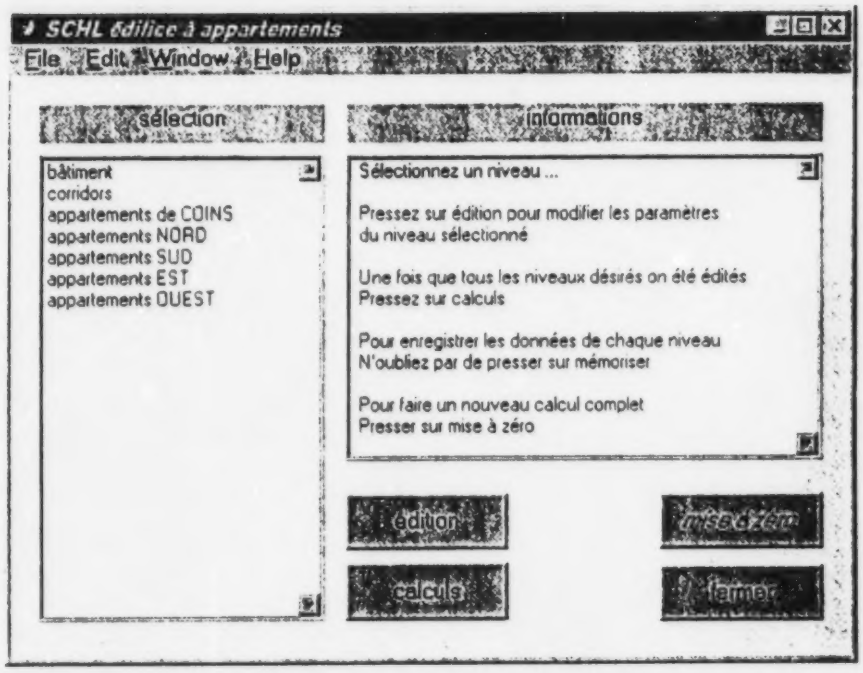


Figure 9.1 La fenêtre du menu principal

Pour faire la sélection d'un niveau d'intervention, on déplace le souris sur le niveau, on active le niveau en cliquant sur le bouton de gauche de la souris et ensuite, on clique sur le bouton pour l'introduction des paramètres d'entrée.

Les boutons suivants sont aussi visibles dans le menu principal pour réaliser les tâches décrites dans les encadrés respectifs :

	Ce bouton lance la procédure d'estimation de l'utilisation de l'énergie dans le bâtiment étudié après avoir introduit les paramètres du bâtiment (*par l'entremise des différents niveaux d'intervention*).
	Ce bouton permet de remettre l'ensemble des paramètres à zéro, pour faire ainsi une autre estimation sans tenir compte des paramètres d'entrée utilisés dans l'estimation précédente.

Dans chacune des fenêtres, le bouton permet de fermer la fenêtre active.

9.1.1 *Fenêtre du niveau d'intervention « bâtiment »*

Cette fenêtre de dialogue permet d'introduire des paramètres généraux du bâtiment (*figure 9.2*). Dans cette version du logiciel seulement la ville d'Ottawa peut être activée, comme région climatique. Il est obligatoire, pour lancer la procédure de calculs, d'introduire des valeurs dans ce niveau.

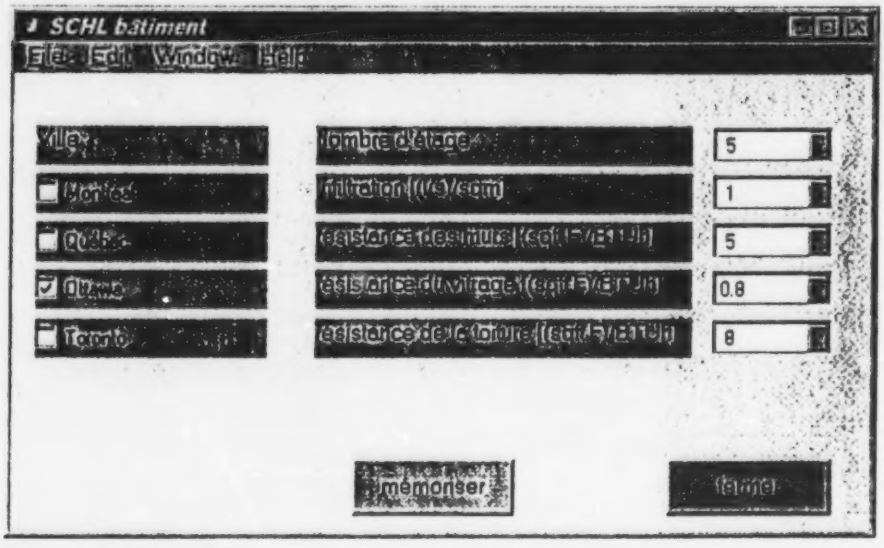


Figure 9.2 La fenêtre de paramètres généraux du bâtiment

Pour introduire les valeurs numériques associées aux descriptions, il suffit de cliquer sur la valeur par défaut. Un ensemble de valeurs prédéterminées (*valeurs discrètes*) apparaîtra (*figure 9.3*). Pour sélectionner la valeur la plus appropriée il faut cliquer sur cette valeur.

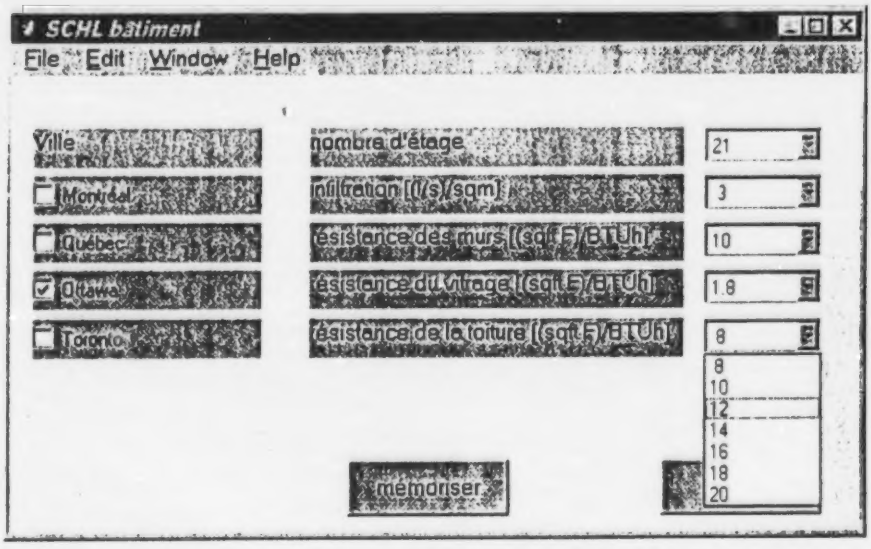


Figure 9.3 La fenêtre du niveau bâtiment

Pour mémoriser les valeurs des paramètres d'entrées, presser sur le bouton mémoriser avant de quitter la fenêtre. Il n'est pas obligatoire de fermer la fenêtre (*cette fenêtre peut rester active pour visualiser les valeurs introduites et faciliter les modifications subséquentes*).

9.1.2 Fenêtre du niveau d'intervention « corridor »

Cette fenêtre de dialogue permet d'introduire les paramètres d'entré des corridors (*figure 9.4*). Il n'est pas obligatoire d'activer ce niveau d'introduction des données (*si la surface des corridors n'est pas introduite, la consommation des corridors sera nulle*).

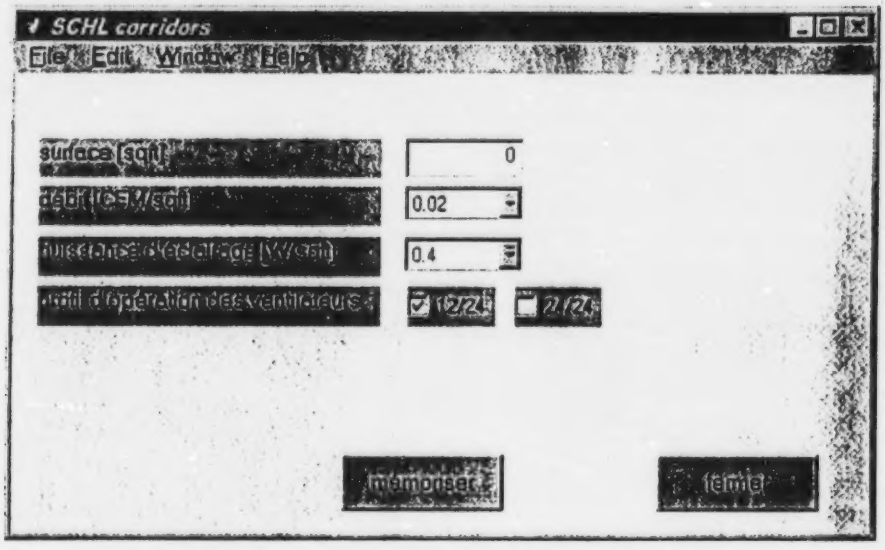


Figure 9.4 La fenêtre des paramètres des corridors

L'introduction des données sous forme de valeurs numériques est présentée sur la figure 9.5. Pour tenir compte de la période d'opération des ventilateurs, deux possibilités sont offertes. On choisit le profil d'opération en cliquant sur le bouton approprié .

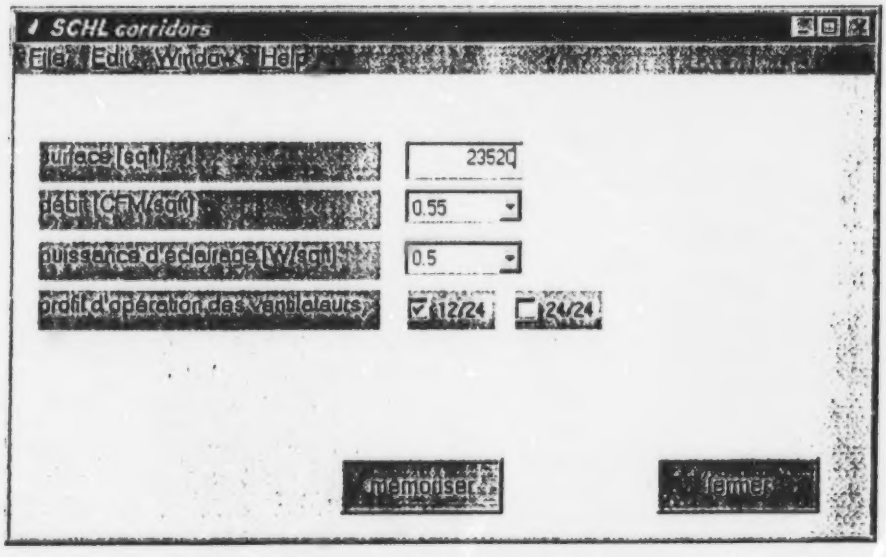


Figure 9.5 La fenêtre du niveau corridors

Avant de quitter la fenêtre, cliquez sur le bouton pour mémoriser les valeurs des paramètres d'entrée. Il n'est pas obligatoire de fermer la fenêtre (*cette*

fenêtre peut rester active pour visualiser les valeurs introduites et faciliter les modifications subséquentes).

9.1.3 Fenêtre du niveau d'intervention « appartements de coin »

Cette fenêtre de dialogue permet d'introduire les paramètres des appartements de coin (*figure 6*) qui peuvent comporter des vitrages dans les murs dont les orientations sont différentes. En supposant une symétrie du bâtiment, deux types d'orientation ont été définis de telle manière qu'en introduisant la superficie du vitrage d'orientation Nord, celle du Sud est aussi introduite. De même pour introduire la superficie du vitrage d'orientation Est et Ouest. Il est à noter que la superficie de vitrage pour une orientation donnée peut être nulle (*figure 9.6*). Pour tenir compte du profil d'utilisation des équipements ménagers et de l'éclairage, deux horaires d'occupation ont été définis. Tel qu'il est expliqué dans le chapitre 4.3 le choix du profil d'occupation *occupé* correspond à un appartement dont les occupants sont présents le jour et le choix du profil d'occupation *inoccupé* correspond à un appartement dont les occupants sont absents le jour. Pour activer l'une ou l'autre horaires d'occupation, il suffit de cliquer sur le bouton approprié . Il est obligatoire, pour lancer la procédure de calculs, d'introduire des valeurs dans ce niveau.

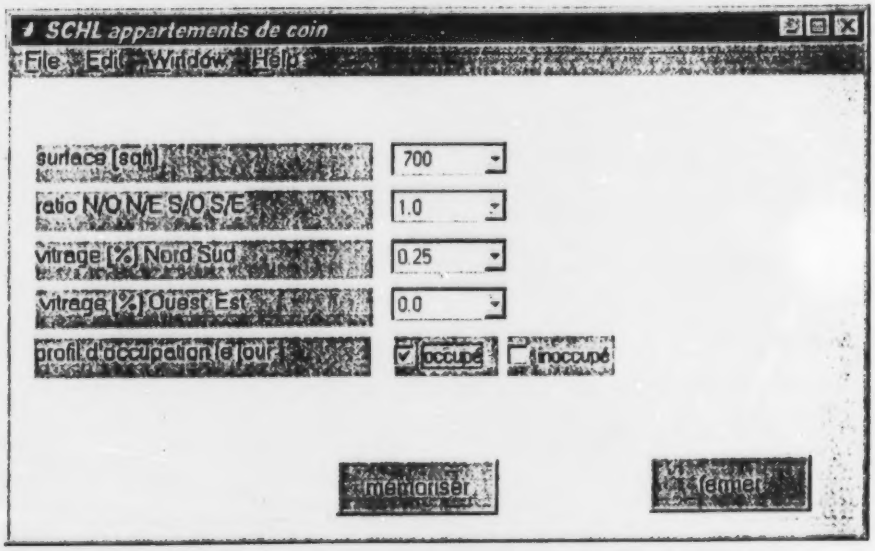


Figure 9.6 La fenêtre des paramètres des appartements de coins

Avant de quitter la fenêtre, cliquer sur le bouton pour mémoriser les valeurs des paramètres d'entrée. Il n'est pas obligatoire de fermer la fenêtre (*cette fenêtre peut rester active pour visualiser les valeurs introduites et faciliter les modifications subséquentes*).

9.1.4 Fenêtre du niveau d'intervention « appartements à une seule orientation »

Cette fenêtre de dialogue permet d'introduire les paramètres des appartements à une seule orientation (*figure 9.7*). Les fenêtres pour introduire les paramètres des appartement d'orientation Nord, Sud, Est et Ouest sont identiques. Dans cette fenêtre jusqu'à quatre types d'appartements peut être définis pour une même orientation. Pour définir plusieurs types d'appartements, le nombre d'appartements associé au type doit être introduit. Il n'est pas obligatoire d'activer ce niveau d'intervention (*si le nombre d'appartements d'un type donné n'est pas introduit dans ce niveau, la consommation sera nulle*).

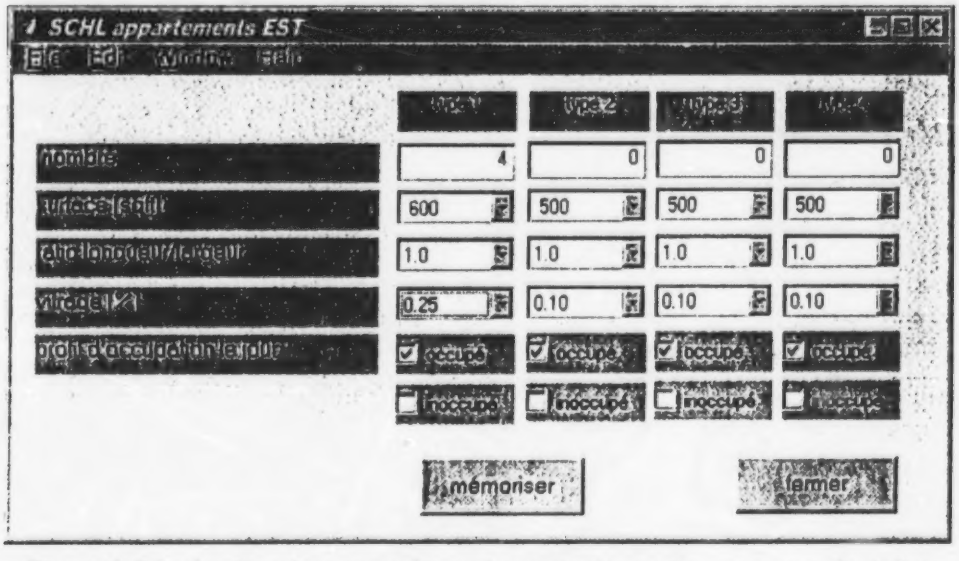
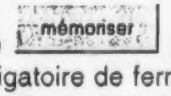


Figure 9.7 La fenêtre des paramètres des appartements avec une orientation

Avant de quitter la fenêtre, cliquer sur le bouton 

pour mémoriser les valeurs des paramètres d'entrées. Il n'est pas obligatoire de fermer la fenêtre (*cette fenêtre peut rester active pour visualiser les valeurs introduites et faciliter les modifications subséquentes*).

9.1.5 *Fenêtres de résultats*

Une fois que l'ensemble des paramètres d'entrée a été introduit, la procédure de calculs peut être lancée en cliquant sur le bouton [calculs] qui se trouve dans la fenêtre principale (*figure 9.1*). Pour éviter les erreurs, il faut, au minimum, introduire les données dans les niveaux *BÂTIMENT* et *APPARTEMENTS DE COIN.*

La fenêtre principale de résultats est présentée sur la figure 9.8. On y trouve les résultats d'estimations de consommation d'électricité [kWh] des différents usages (chauffage, climatisation etc.) relatives aux appartements, corridors et au bâtiment. Les puissances maximales de base (utilitaires éclairage) et de chauffage pour l'ensemble du bâtiment sont aussi présentées. Pour les remarques sur la méthode de calcul de ces puissance voir le chapitre 7.3.1.

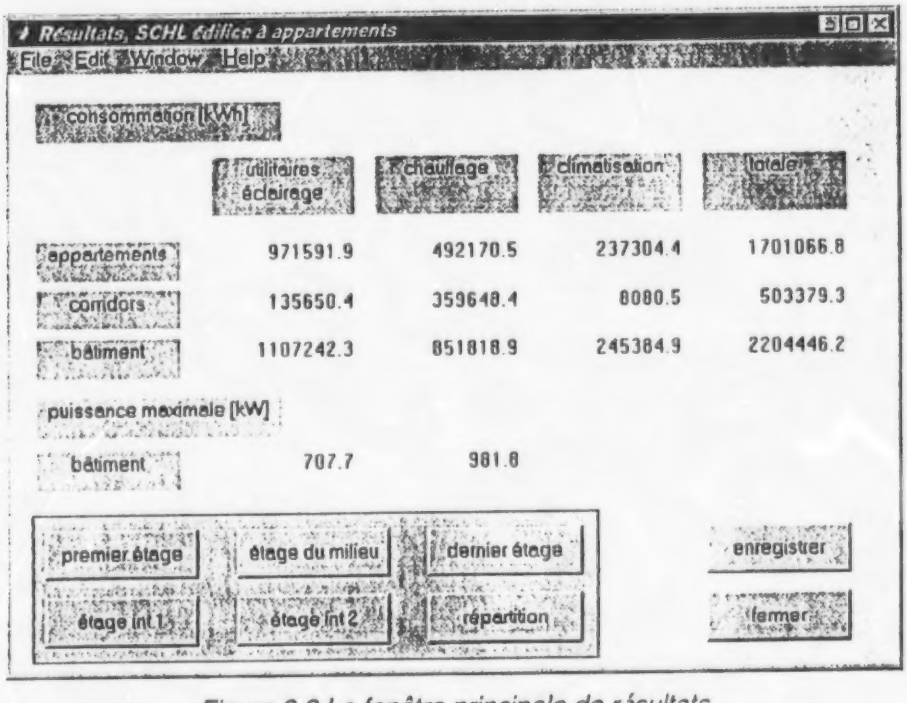


Figure 9.8 La fenêtre principale de résultats

Il est possible d'obtenir la consommation électrique surfacique [kWh/pi^2] des étages types (*figure 9.9*) pour les usages et les orientations, en sélectionnant le bouton associé. La répartition de la consommation pour les différents usages de l'énergie du bâtiment (*figure 9.10*) est accessible en pressant sur le bouton [répartition]. Il est à noter que pour visualiser les résultats mentionnés ci-dessus, la fenêtre sur la figure 9.8 doit être toujours activée.

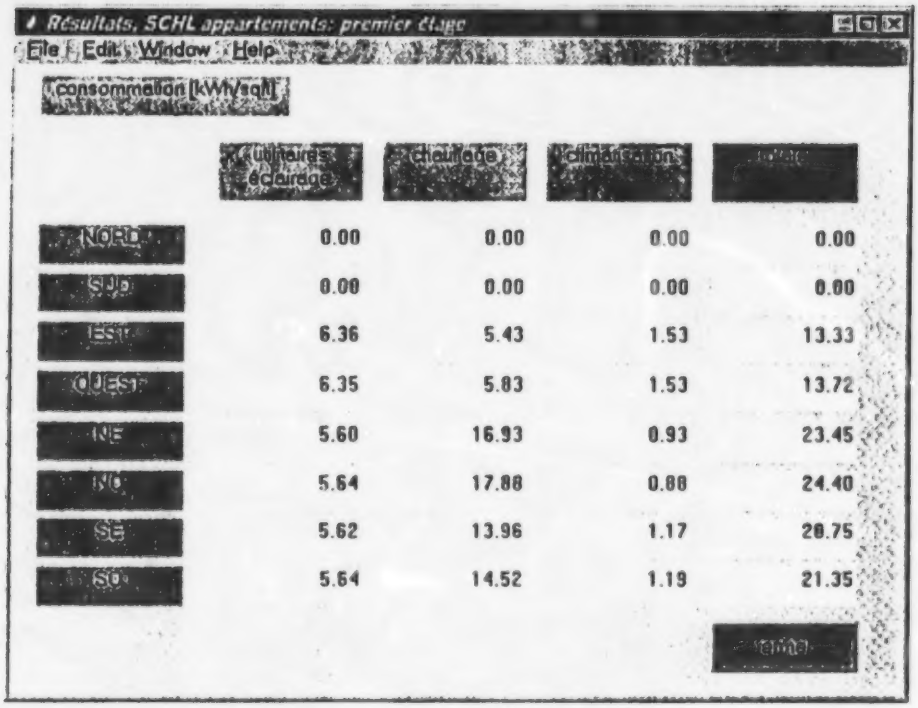


Figure 9.9 La fenêtre de résultats d'étage type

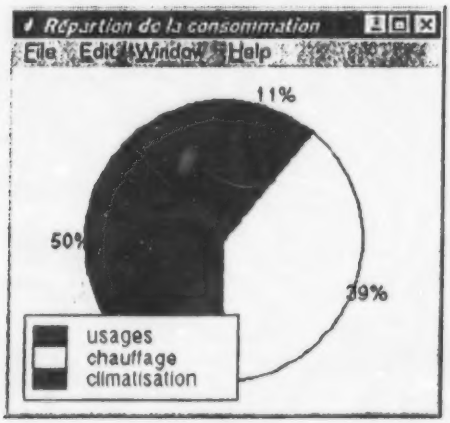


Figure 9.10 La répartition des résultats

Pour permettre une visualisation ultérieure des résultats et faire des comparaisons entre les différentes estimations, il est possible d'enregistrer les résultats en pressant sur le bouton de la fenêtre principale de résultats (*figure 9.8*). Il est à noter que lors de l'enregistrement des résultats, l'extension du fichier .MAT doit être conserver (*figure 9.11*).

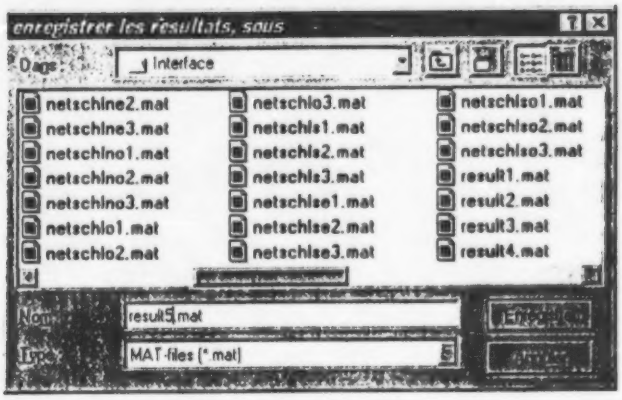


Figure 9.11 La fenêtre d'enregistrement des résultats

La description des autres boutons visibles dans la fenêtre principale de résultats (*figure 9.8*) est présentée dans les encadrés respectifs

premier étage	Résultats de consommation surfacique pour les usages et les orientations du premier étage.
étage du milieu	Résultats de consommation surfacique pour les usages et les orientations de l'étage du milieu.
dernier étage	Résultats de consommation surfacique pour les usages et les orientations du dernier étage.
étage int 1	Résultats de consommation surfacique moyenne pour les usages et les orientations de l'étage situé entre le premier étage et l'étage du milieu.
étage int 2	Résultats de consommation surfacique moyenne pour les usages et les orientations de l'étage situé entre l'étage du milieu et le dernier étage

9.2 Interface pour la récupération des résultats d'une précédante analyse

Pour récupérer les résultats des précédantes analyses, il s'agit, en ligne de commande de *MATLAB*, de taper la commande « schlres ». Une fenêtre de dialogue (*figure 9.12*) apparaîtra.

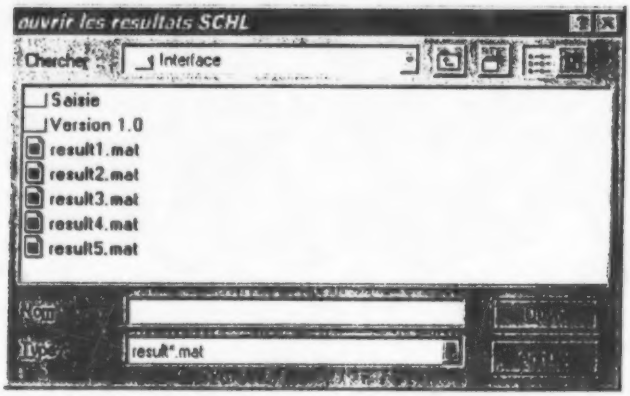


Figure 9.12 La fenêtre de récupération des résultats

Choisissez le fichier qui correspond au résultat désiré (*figure 9.13*) en déplaçant la souris sur le nom du fichier et presser sur le bouton de gauche de la souris. Vous pouvez, aussi, inscrire le nom du fichier dans la case associée au NOM. Assurez vous d'être dans le bon répertoire. Les fenêtres de résultats et les options sont identiques aux fenêtres de résultats présentées dans la section *Fenêtres de résultats.*

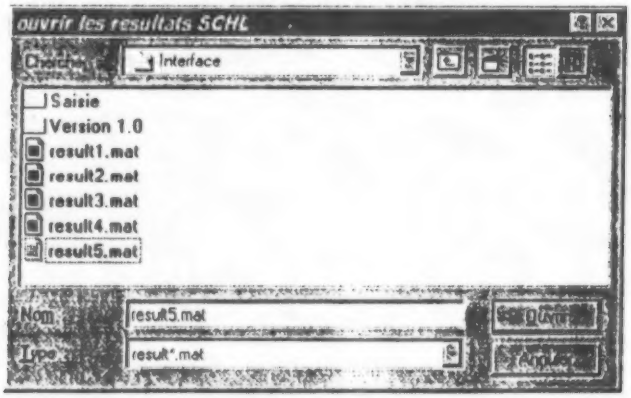


Figure 9.13 La fenêtre de récupération des résultats

9.3 Interface pour la récupération et la comparaison des résultats des précédantes analyses

Pour comparer les résultats des analyses précédantes, il faut, en ligne de commande de *MATLAB*, taper la commande « schlcomp ». La comparaison des résultats se fait seulement entre deux fichiers de résultats. Une première fenêtre de dialogue apparaîtra pour sélectionner le fichier de résultats de référence (*figure 9.14*).

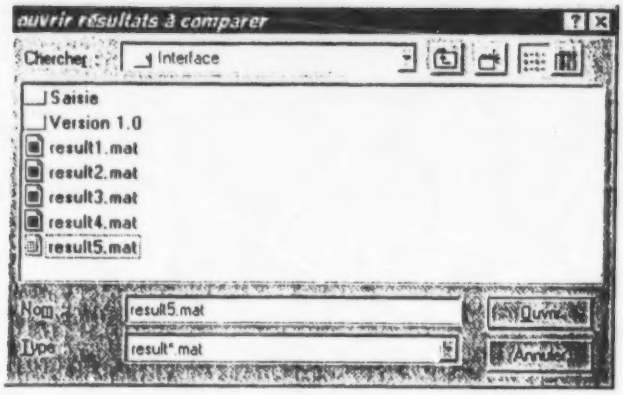


Figure 9.14 La fenêtre de récupération des résultats de référence

Une fois le fichier de référence sélectionné, une deuxième fenêtre de dialogue apparaîtra (*figure 9.15*) pour identifier le fichier de résultats à comparer avec le fichier de résultats de référence (*fichier sélectionné dans la fenêtre précédente*).

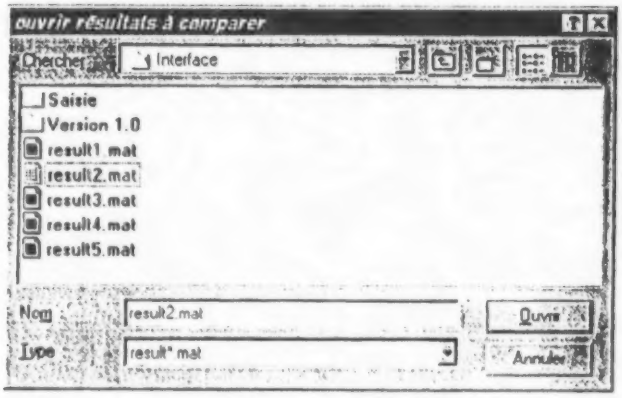


Figure 9.15 La fenêtre de récupération des résultats à comparer

Les fenêtres de résultats sont similaires à la description faite dans la section *Fenêtres de résultats*. Puisqu'il s'agit d'une comparaison (*différence de consommation entre le fichier résultats à comparer et le fichier de résultats de référence*) les résultats de l'analyse peuvent être négatifs (*figure 9.16*).

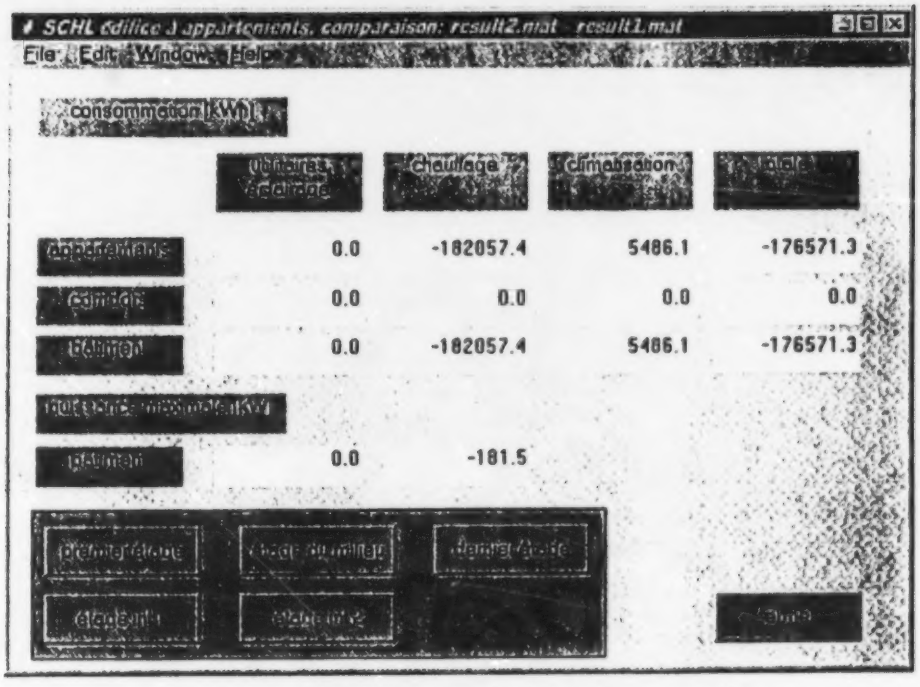


Figure 9.14 La fenêtre des résultats de comparaison

9.4 *Fichiers MATLAB d'opération des interfaces*

Les fichiers *MATLAB* d'opération des interfaces (52 fichiers) sont définis dans les encadrés respectifs. Assurez vous d'avoir l'ensemble de ces fichiers pour l'utilisation des différents interfaces.

schl.m	Boucle de traitements de données pour l'introduction des paramètres d'entrées, le traitement des données et le calcul des résultats.
schlres.m	Boucle de traitements pour la récupération des résultats d'une analyse précédentes.
schlcomp.m	Boucle de traitements pour la récupération des résultats et la comparaison des résultats de deux analyses précédantes.
schlmenu1.m	Boucle de traitements de la fenêtre du menu principal.
schlmenu1.mat	Données de la fenêtre du menu principal.
schlmenu2.m	Boucle de traitements de la fenêtre d'introduction des paramètres généraux du bâtiment.
schlmenu2.mat	Données de la fenêtre d'introduction des paramètres généraux du bâtiment.
schlmenu3.m	Boucle de traitements de la fenêtre d'introduction des paramètres des corridors.
schlmenu3.mat	Données de la fenêtre d'introduction des paramètres des corridors.
schlmenu4.m	Boucle de traitements de la fenêtre d'introduction des paramètres des appartements de coins.
schlmenu4.mat	Données de la fenêtre d'introduction des paramètres des appartements de coins.
schlmenu5.m	Boucle de traitements de la fenêtre d'introduction des paramètres des appartements à une seule orientation.
schlmenu5.mat	Données de la fenêtre d'introduction des paramètres des appartements à une seule orientation.
schlmenu6.m	Boucle de traitements de la fenêtre principale de résultats reliée à schl.m.
schlmenu6.mat	Données de la fenêtre principale de résultats reliée à schl.m.
schlmenu6a.m	Boucle de traitements de la fenêtre principale de résultats reliée à schlres.m.
schlmenu6a.mat	Données de la fenêtre principale de résultats à schlres.m.
schlmenu6b.m	Boucle de traitements de la fenêtre de répartition de la consommation.
schlmenu6b.mat	Données de la fenêtre principale de répartition de la consommation.
schlmenu6c.m	Boucle de traitements de la fenêtre principale de résultats reliée à schlcomp.m.
schlmenu6c.mat	Données de la fenêtre principale de résultats à schlcomp.m.
schlmenu7.m	Boucle de traitements de la fenêtre de résultats des étages types.
schlmenu7.mat	Données de la fenêtre principale de résultats des étages types.
neurone1.m	Algorithmes de calculs des réseaux de neurones pour l'estimation de la consommation

neurone2.m	Algorithmes de calculs des réseaux de neurones pour l'estimation de la puissance
matini.mat	Paramètres de données d'entrées d'initialisation.
netschlcorr1.mat	Poids des réseaux de neurones pour la consommation d'électricité des usages des corridors
netschlcorr2.mat	Poids des réseaux de neurones pour la consommation d'électricité de chauffage des corridors
netschlcorr3.mat	Poids des réseaux de neurones pour la consommation d'électricité de climatisation des corridors
netschlcorr1.mat	Poids des réseaux de neurones pour la consommation d'électricité des usages des corridors
netschlcorr2.mat	Poids des réseaux de neurones pour la consommation d'électricité de chauffage des corridors
netschlcorr3.mat	Poids des réseaux de neurones pour la consommation d'électricité de climatisation des corridors
netschln1.mat	Poids des réseaux de neurones pour la consommation d'électricité des usages d'un appartement d'orientation Nord.
netschln2.mat	Poids des réseaux de neurones pour la consommation d'électricité de chauffage d'un appartement d'orientation Nord.
netschln3.mat	Poids des réseaux de neurones pour la consommation d'électricité de climatisation d'un appartement d'orientation Nord.
netschls1.mat	Poids des réseaux de neurones pour la consommation d'électricité des usages d'un appartement d'orientation Sud.
netschls2.mat	Poids des réseaux de neurones pour la consommation d'électricité de chauffage d'un appartement d'orientation Sud.
netschls3.mat	Poids des réseaux de neurones pour la consommation d'électricité de climatisation d'un appartement d'orientation Sud.
netschle1.mat	Poids des réseaux de neurones pour la consommation d'électricité des usages d'un appartement d'orientation Est.
netschle2.mat	Poids des réseaux de neurones pour la consommation d'électricité de chauffage d'un appartement d'orientation Est.
netschle3.mat	Poids des réseaux de neurones pour la consommation d'électricité de climatisation d'un appartement d'orientation Est.
netschlo1.mat	Poids des réseaux de neurones pour la consommation d'électricité des usages d'un appartement d'orientation Ouest.
netschlo2.mat	Poids des réseaux de neurones pour la consommation d'électricité de chauffage d'un appartement d'orientation Ouest.
netschlo3.mat	Poids des réseaux de neurones pour la consommation d'électricité de climatisation d'un appartement d'orientation Ouest.
netschlne1.mat	Poids des réseaux de neurones pour la consommation d'électricité des usages d'un appartement d'orientation Nord-Est.
netschlne2.mat	Poids des réseaux de neurones pour la consommation d'électricité de chauffage d'un appartement d'orientation Nord-Est
netschlne3.mat	Poids des réseaux de neurones pour la consommation d'électricité de climatisation d'un appartement d'orientation Nord-Est.

netschlno1.mat	Poids des réseaux de neurones pour la consommation d'électricité des usages d'un appartement d'orientation Nord-Ouest.
netschlno2.mat	Poids des réseaux de neurones pour la consommation d'électricité de chauffage d'un appartement d'orientation Nord-Ouest.
netschlno3.mat	Poids des réseaux de neurones pour la consommation d'électricité de climatisation d'un appartement d'orientation Nord-Ouest.
netschlse1.mat	Poids des réseaux de neurones pour la consommation d'électricité des usages d'un appartement d'orientation Sud-Est.
netschlse2.mat	Poids des réseaux de neurones pour la consommation d'électricité de chauffage d'un appartement d'orientation Sud-Est.
netschlse3.mat	Poids des réseaux de neurones pour la consommation d'électricité de climatisation d'un appartement d'orientation Sud-Est.
netschlso1.mat	Poids des réseaux de neurones pour la consommation d'électricité des usages d'un appartement d'orientation Sud-Ouest.
netschlso2.mat	Poids des réseaux de neurones pour la consommation d'électricité de chauffage d'un appartement d'orientation Sud-Ouest.
netschlso3.mat	Poids des réseaux de neurones pour la consommation d'électricité de climatisation d'un appartement d'orientation Sud-Ouest.
netschl1_1.mat	Poids des réseaux de neurones pour la puissance maximale d'électricité de chauffage des appartement du premier étage à orientation simple.
netschl2_1.mat	Poids des réseaux de neurones pour la puissance maximale d'électricité de chauffage des appartement du premier étage à orientation double.
netschl1_2.mat	Poids des réseaux de neurones pour la puissance maximale d'électricité de chauffage des appartement de l'étage du milieu à orientation simple.
netschl2_2.mat	Poids des réseaux de neurones pour la puissance maximale d'électricité de chauffage des appartement de l'étage du milieu à orientation double.

10. Conclusions

L'objectif de ce projet était de développer une méthode rapide d'estimations énergétiques des bâtiments en appliquant les techniques de l'intelligence artificielle. La description de tous les étapes de la méthode est présentée dans ce rapport.

L'utilisation de la méthode développée permettra la conception des systèmes d'aide aux estimations énergétiques de différents types de bâtiments. L'exemple de l'utilisation de la méthode à la conception du Système d'Aide aux Estimations Énergétiques (SAEE) des bâtiments d'habitation de 5 étages et plus est présentée dans ce rapport. La validation des modules d'intelligence artificielle démontre que la précision du système SAEE est très élevée. Cette validation a été réalisée en deux étapes : premièrement par la comparaison des résultats des simulations énergétiques et des résultats obtenus par les modules d'intelligence artificielle, et deuxièmement par la comparaison des résultats du SAEE et des consommations mesurées d'énergie dans un bâtiment à Ottawa.

Le système SAEE permet de déterminer la consommation annuelle d'énergie de chauffage de refroidissement et de base (utilitaires et éclairage) en faisant varier les principaux paramètres énergétiques du bâtiment. Le SAEE permet d'analyser l'impact de ces paramètres variables sur la consommation d'énergie dans les bâtiments d'habitation. Même si la précision du SAEE est très élevée, il faut noter que le SAEE n'est qu'un outil d'estimation et son rôle n'est pas de remplacer les logiciel de simulation détaillée tel que DOE-2. Le rôle du SAEE est plutôt de remplir le vide qui existe entre les méthodes simples d'estimations énergétiques (degrés-jours, Bin) est les simulations détaillées des bâtiments.

Le SAEE est développé pour les conditions climatiques d'Ottawa. Pour l'utiliser dans les conditions climatiques différentes il faut faire une correction appropriée de la consommation de chauffage et de refroidissement. Pour éviter ces corrections, dans la prochaine application de la méthode à la conception d'un autre système SAEE il faudrait envisager de considérer le nombre de degrés-jours comme un paramètre variable. Il est évident que l'étape de la création de la base des données pour l'apprentissage des réseaux de neurones doit être modifiée en conséquence.

Le système SAEE a été développé dans l'environnement du logiciel MatLab. Pour une utilisation plus large du SAEE il est nécessaire de traduire le code du SAEE en langage C**. Les interfaces d'entrée des données et de résultats peuvent être aussi modifiées pendant cette étape selon les besoins définis par la SCHL.

11. Bibliographie

[1] Keider J.F, Haberl P.E : Predicting Hourly Building Energy Usage, ASHRAE Journal, June 1994,72-81.

[2] Kajl S, Malinowski, Czogala, E, Balazinski M : Prediction of Building Thermal Performance Using Fuzzy Decision Support System, Proceedings of FUZZ-IEEE/IFES'95 Conference, March 1995, Yokohama, 225-232.

[3] Kajl S, Poulin R, Malinowski P, Roberge M.A : Fuzzy Assistant for Evaluation of Building Energy Consumption, Proceedings of International Fuzzy Systems and Intelligent Control Conference, April 1996, Maui, USA. 67-74.

[4] Kajl S, Roberge M.A, Lamarche L, Malinowski P : Evaluation of Building Energy Consumption Based on Fuzzy Logic and Neural Networks Applications Systems, Congrès CLIMA 2000, Brussels, Août 1997, CD-Rom, paper no 264

[5] Enquête 1993 sur l'utilisation de l'énergie par les ménages, *Rapport Statistique*

[6] Beta plan support services : commercial building profiles, *Final Report*, Submitted by : Marbek Resource Consultants. Submitted to : Buildings Group, CANMET Natural resources Canada, Avril 1996.

[7] Energy audits of high-rise residential building, *Final Report*, Prepared by : Scanada Consultants Limited, Prepared for : SCHL, Décembre 1996

[8] Heating, ventilating and conditioning, Analysis and design, F.C. McQuiston, J.D. Parker, Fourth Edition, 1994.

[9] Building energy analysis program, DOE-2 Engineers Manual, Lawrence Berkeley Laboratory and Los Alamos National Laboratory, November 1982.

[10] Economie de chauffage, de climatisation et d'éclairage, *Energie Mines et Ressources Canada*

[11] Development of design procedures and guidelines for reducing electric demand by air leakage control in high-rise residential buildings, *Final Report*, Prepared by : Scanada Consultants Limited et CanAm Building Envelope Specialists Inc. Prepared for : Ontario Hydro et SCHL, 1991

[12] Que consomment vos appareils électriques, dossier énergie. http://www.hydroquebec.com/consommation/tableau.html

ANNEXE A

Le tableau A.1 contient les consommations de base telles la consommation de l'éclairage, des équipements et des ventilateurs.

Tableau A.1 Répartition de la consommation de base

	Document [3]	DOE-2 (scénario n° 1)	DOE-2 (scénario n° 2)
Éclairage	*366 464 kWh*	*199 188 kWh*	*188 441 kWh*
Équipements	*232 898 kWh*	*529 261 kWh*	*608 669 kWh*
Ventilateurs	*25 432 kWh*	*24 876 kWh*	*24 876 kWh*

Il faut rappeler que l'éclairage intérieur et l'ombrage des fenêtres dans notre modèle sont gérés par une fonction supplémentaire introduite au logiciel DOE-2 dont la description est présentée dans le chapitre 4.4.1.1. Cette fonction a pour but de simuler l'utilisation de l'ombrage et de l'éclairage d'une façon réaliste c'est-à-dire en fonction de l'ensoleillement et l'occupation des appartements. La consommation d'énergie par l'éclairage ainsi obtenue est de 0.94 et 0.85 kWh/pi^{2}an respectivement pour les horaires n° 1 et 2 et elle est de 3.28 kWh/pi^{2}an pour les corridors. Selon le document [6], qui nous a servi entre autres à déterminer les paramètres par défaut, l'éclairage moyen dans les appartements est de 1.1 à 1.3 kWh/pi^{2}an et de 2.7 à 3.1 kWh/pi^{2}an dans le corridors. En tenant compte des superficies de corridors et d'appartements, la consommation totale d'éclairage dans le bâtiment étudié devrait être selon le même document de 1.345 à 1.575 kWh/pi^{2}an. Elle est estimée selon le document [7] à 2.383 kWh/pi^{2}an donc largement en dessus de la valeur moyenne. Par contre, elle est de 1.226 à 1.295 kWh/pi^{2}an selon les simulations à l'aide du logiciel DOE-2 donc un peu en dessous de la valeur moyenne. Il nous semble que la consommation d'énergie par l'éclairage est surestimée dans le document [7]. C'est bien au contraire quant à la consommation d'énergie par les équipements qu'elle semble être sous-estimée dans le document [7]. Elle est estime à 1.515 kWh/pi^{2}an dans le document [7], tandis que la moyenne présentée dans le document [6] est de 3.8 kWh/pi^{2}an (incluant tous les équipements). Selon la simulation cette consommation est de 3.44 à 3.96 kWh/pi^{2}an respectivement pour le scénario 1 et 2, c'est qui correspond à la moyenne. Cependant, il est à noter que la somme des consommations de l'éclairage et des équipements estimées dans le document [7] est de 599 362 kWh et elle ne diffère pas beaucoup des résultats obtenus par la simulation qui sont de 728 449 kWh et 797 110 kWh respectivement pour les horaires 1 et 2. Le résumé de cette comparaison se trouve dans le tableau A.2.

Tableau A.2 Les consommations d'énergie par l'éclairage et les équipements

Consom. kWh/pi²an	Appartements		Corridors		Total du bâtiment		
	Moyenne doc. [2]	Simulation DOE-2	Moyenne doc. [2]	Simulation DOE-2	Moyenne doc. [2]	Simulation DOE-2	Estimé doc. [3]
Éclairage	1.1 à 1.3	0.85 à 0.94	2.7 à 3.1	3.28	1.345 à 1.575	1.226 à 1.295	2.383
Équipem.					3.8	3.44 à 3.96	1.515

Le tableau A.3 contient les résultats de simulations et les estimés présentés dans le document [7] concernant les déperdition de chaleur et des gains de chaleur.

Tableau A.3 Déperditions et gains de chaleur

Déperditions de chaleur [kWh]	Estimations (document [3])	Simulation DOE-2	
Murs et toiture	322 441		389 060
Fenêtres et portes	475 972		454 221
Infiltration	343 782		478 213
Ventilation	294 450	(module LOAD) (module SYSTEMS)	442 064 357 419
Gains de chaleur [kWh]			
Éclairage et équipements	297 751	(scénario 1) (scénario 2)	1 093 822 1 015 316
Solaire	190 434		379602

Il y a une importante différence concernant les déperditions de chaleur par l'infiltration qui s'explique par le fait que l'infiltration mesurée est de 2.51 l/sm² tandis que celle admise pour la simulation est de 3 l/sm² c'est qui est la valeur la plus proche de 2.51 parmi les valeurs par défaut disponibles dans le SAEE.

En ce qui concerne la ventilation, la différence d'environ 63 000 kWh entre l'estimation du document [7] et les résultats de simulation tirés du module SYSTEMS n'est pas très importante et elle peut s'expliquer par la période d'opération des ventilateurs. Dans le document [7] on ne mentionne pas du tout l'horaire d'opération de ventilateur. On en parle dans le document [11] mais il s'agit dans ce cas des horaires d'opération (7 heures) observées dans l'année 1990/1991. Dans le SAEE les opérations disponibles sont 12/24 et 24/24 heures. Nous avons choisi pour la simulation l'opération de 12 heures c'est qui peut faire la différence.

Quant aux gains dus à l'éclairage et les équipements il nous semble qu'ils sont sous-estimés dans le document [7]. Selon ces estimés la consommation de l'éclairage et des équipements est de 599 362 kWh, tandis que les gains ne sont que 297 751 kWh. Étant donné qu'une partie des gains dus à l'éclairage est stockée dans la construction du bâtiment et restituée plus tard, on peut admettre que la majorité de l'énergie consommée par l'éclairage est récupérée comme les gains de chaleur. Quant aux gains dus aux équipements ils peuvent être plus importants que l'énergie consommée parce que les réfrigérateurs dégagent plus de chaleur que l'énergie consommée par les compresseurs. Il est possible que dans l'analyse présentée

dans le document [7] on ne prenne en considération que les gains contribuant à la diminution de la demande de chauffage, tandis que dans le cas de simulation on considère tous les gains de chaleur même s'ils dépassent la charge de chauffage et rendent la demande de chauffage égale à zéro. Il est à souligner que même si les gains obtenus par la simulation sont très élevés, il ressort des résultats présentés dans les tableaux A.1 et A.2 qu'une partie seulement de ces gains a l'impact sur la consommation de chauffage du bâtiment.

Les gains dus à l'ensoleillement semblent être très faibles selon l'estimation du document [7]. Si on compare ces gains à l'ensoleillement pour la période du septembre au mai présenté dans ce même document, on peut constater que le *shading coeffcient* SC des fenêtres devrait être d'environ 0.25 ce qui nous semble assez faible. Dans la simulation on a admis SC = 0.5 si l'ombrage est activé et SC ordinaire pour les fenêtres double vitrage si l'ombrage n'est pas activé. Il nous semble que ces valeurs de *shading coeffcient* sont assez réalistes et que les gains de chaleur dus à l'ensoleillement sont sous-estimés dans le document [7].

Conclusion

Il résulte des paragraphes précédents que la différence entre la consommation obtenue par la simulation et celle facturée en 1993/1994 est de 79 295 kWh ce qui représente 4.7% de la consommation facturée. La différence de 212 959 kWh au niveau de chauffage entre les simulations et les estimations présentées dans le document [7] résulte, selon nous, des sous-estimations des gains de chaleur dus à l'ensoleillement et des gains internes du document [7] qui ont l'impact sur l'estimation de la consommation de chauffage.

ANNEXE B

Les tableaux suivants sont les résultats statistiques globaux des analyses effectuées sur les réseaux de neurones pour l'ensemble du système.

Résultats statistiques des consommations d'électricité de base de chauffage et de refroidissement.

1. consommation annuelle d'électricité de base :
    1. les appartements à orientations simples :

- le nord :
électricité ATN, 200 simulations
moyenne : 3977.4519
écart type : 19.592
coefficient de variation : 0.0049258
erreur cumulative absolue : 0.0037337

- l'est :
électricité ATE, 200 simulations
moyenne : 4008.7425
écart type : 20.2472
coefficient de variation : 0.0050508
erreur cumulative absolue : 0.0039314

- le sud :
électricité ATS, 200 simulations
moyenne : 3989.5211
écart type : 22.0691
coefficient de variation : 0.0055318
erreur cumulative absolue : 0.00425

- l'ouest :
électricité ATO, 200 simulations
moyenne : 3957.3046
écart type : 15.2734
coefficient de variation : 0.0038595
erreur cumulative absolue : 0.0029453

    2. les appartements à orientations doubles :

- le nord-est :
électricité ATNE, 200 simulations
moyenne : 4032.4158
écart type : 33.5437
coefficient de variation : 0.0083185
erreur cumulative absolue : 0.0055333

- le sud-est :
électricité ATSE, 200 simulations
moyenne : 4038.0613
écart type : 28.7772
coefficient de variation : 0.0071265
erreur cumulative absolue : 0.005344

- le nord-ouest :
électricité ATNO, 200 simulations
moyenne : 4009.2355
écart type : 42.1393
coefficient de variation : 0.010511
erreur cumulative absolue : 0.0055893

- le sud-ouest :
électricité ATSO, 200 simulations
moyenne : 4014.2549
écart type : 30.7225
coefficient de variation : 0.0076534
erreur cumulative absolue : 0.0052799

2. consommation annuelle d'électricité de chauffage :
    1. les appartements à orientations simples :

- le nord :

chauffage ATN1, 200 simulations
moyenne : 11224.7865
écart type : 219.1632
coefficient de variation : 0.019525
erreur cumulative absolue : 0.01605

chauffage ATN2A, 200 simulations
moyenne : 681.8209
écart type : 26.4872
coefficient de variation : 0.038848
erreur cumulative absolue : 0.030354

chauffage ATN2, 200 simulations
moyenne : 946.7315
écart type : 29.1426
coefficient de variation : 0.030782
erreur cumulative absolue : 0.024228

chauffage ATN3, 200 simulations
moyenne : 4047.5479
écart type : 53.9925
coefficient de variation : 0.01334
erreur cumulative absolue : 0.010754

- le sud :

chauffage ATS1, 200 simulations
moyenne : 9067.3507
écart type : 166.2611
coefficient de variation : 0.018336
erreur cumulative absolue : 0.014748

chauffage ATS2A, 200 simulations
moyenne : 154.0492
écart type : 12.232
coefficient de variation : 0.079403
erreur cumulative absolue : 0.056759

chauffage ATS2, 200 simulations
moyenne : 274.1803
écart type : 16.7356
coefficient de variation : 0.061039
erreur cumulative absolue : 0.045419

chauffage ATS3, 200 simulations
moyenne : 2306.9384
écart type : 56.3519
coefficient de variation : 0.024427
erreur cumulative absolue : 0.019375

- l'est :

chauffage ATE1, 200 simulations
moyenne : 10524.0566
écart type : 158.135
coefficient de variation : 0.015026
erreur cumulative absolue : 0.011439

chauffage ATE2A, 200 simulations
moyenne : 436.7946
écart type : 23.6385
coefficient de variation : 0.054118
erreur cumulative absolue : 0.042326

chauffage ATE2, 200 simulations
moyenne : 790.1923
écart type : 26.2642
coefficient de variation : 0.033238
erreur cumulative absolue : 0.025783

chauffage ATE3, 200 simulations
moyenne : 3339.4978
écart type : 59.9361
coefficient de variation : 0.017948
erreur cumulative absolue : 0.014221

- l'ouest :

chauffage ATO1, 200 simulations
moyenne : 11479.08
écart type : 134.7077
coefficient de variation : 0.011735
erreur cumulative absolue : 0.0094037

chauffage ATO2A, 200 simulations
moyenne : 527.7051
écart type : 25.3092
coefficient de variation : 0.047961
erreur cumulative absolue : 0.037061

chauffage ATO2, 200 simulations
moyenne : 1864.3896
écart type : 43.7295
coefficient de variation : 0.023455
erreur cumulative absolue : 0.018597

chauffage ATO3, 200 simulations
moyenne : 3486.659
écart type : 59.0128
coefficient de variation : 0.016925
erreur cumulative absolue : 0.013059

2. les appartements à orientations doubles :

- le nord-est :

chauffage ATNE1, 200 simulations
moyenne : 20794.6977
écart type : 592.9927
coefficient de variation : 0.028517
erreur cumulative absolue : 0.020447

chauffage ATNE2A, 200 simulations
moyenne : 1577.9229
écart type : 78.0382
coefficient de variation : 0.049456
erreur cumulative absolue : 0.03534

chauffage ATNE2, 200 simulations
moyenne : 2195.9565
écart type : 82.3787
coefficient de variation : 0.037514
erreur cumulative absolue : 0.026405

chauffage ATNE3, 200 simulations
moyenne : 5357.4697
écart type : 105.4353
coefficient de variation : 0.01968
erreur cumulative absolue : 0.014977

- le nord-ouest :

chauffage ATNO1, 200 simulations
moyenne : 21581.6496
écart type : 475.9776
coefficient de variation : 0.022055
erreur cumulative absolue : 0.016625

chauffage ATNO2A, 200 simulations
moyenne : 1669.6725
écart type : 80.348
coefficient de variation : 0.048122
erreur cumulative absolue : 0.034299

chauffage ATNO2, 200 simulations
moyenne : 3099.2028
écart type : 87.6804
coefficient de variation : 0.028291
erreur cumulative absolue : 0.020985

chauffage ATNO3, 200 simulations
moyenne : 5462.7187
écart type : 117.4252
coefficient de variation : 0.021496
erreur cumulative absolue : 0.01674

- le sud-est :

chauffage ATSE1, 200 simulations
moyenne : 18971.5053
écart type : 389.3252
coefficient de variation : 0.020522
erreur cumulative absolue : 0.01581

chauffage ATSE2A, 200 simulations
moyenne : 850.9695
écart type : 50.0883
coefficient de variation : 0.05886
erreur cumulative absolue : 0.043025

chauffage ATSE2, 200 simulations
moyenne : 1337.8838
écart type : 55.0084
coefficient de variation : 0.041116
erreur cumulative absolue : 0.029091

chauffage ATSE3, 200 simulations
moyenne : 3884.6789
écart type : 107.8566
coefficient de variation : 0.027765
erreur cumulative absolue : 0.020142

- le sud-ouest :

chauffage ATSO1, 200 simulations
moyenne : 19728.4326
écart type : 570.8516
coefficient de variation : 0.028935
erreur cumulative absolue : 0.021592

chauffage ATSO2A, 200 simulations
moyenne : 902.3297
écart type : 50.3421
coefficient de variation : 0.055791
erreur cumulative absolue : 0.043014

chauffage ATSO2, 200 simulations
moyenne : 2104.9569
écart type : 67.5957
coefficient de variation : 0.032113
erreur cumulative absolue : 0.024151

chauffage ATSO3, 200 simulations
moyenne : 3965.0769
écart type : 96.4654
coefficient de variation : 0.024329
erreur cumulative absolue : 0.018036

3. consommation annuelle d'électricité de refroidissement :
    1. les appartements à orientations simples :

- le nord :

refroidissement ATN1, 200 simulations
moyenne : 722.9444
écart type : 8.1132
coefficient de variation : 0.011222
erreur cumulative absolue : 0.0087468

refroidissement ATN2, 200 simulations
moyenne : 880.4889
écart type : 7.1072
coefficient de variation : 0.0080718
erreur cumulative absolue : 0.0064694

refroidissement ATN2A, 200 simulations
moyenne : 910.2292
écart type : 7.2141
coefficient de variation : 0.0079256
erreur cumulative absolue : 0.0064954

refroidissement ATN3, 200 simulations
moyenne : 744.6788
écart type : 6.8983
coefficient de variation : 0.0092635
erreur cumulative absolue : 0.0072691

- le sud :

refroidissement ATS1, 200 simulations
moyenne : 988.5045
écart type : 14.0591
coefficient de variation : 0.014223
erreur cumulative absolue : 0.01133

refroidissement ATS2, 200 simulations
moyenne : 1162.0422
écart type : 9.8248
coefficient de variation : 0.0084548
erreur cumulative absolue : 0.0067255

refroidissement ATS2A, 200 simulations
moyenne : 1194.0916
écart type : 11.1284
coefficient de variation : 0.0093195
erreur cumulative absolue : 0.0074543

refroidissement ATS3, 200 simulations
moyenne : 1019.7739
écart type : 10.5923
coefficient de variation : 0.010387
erreur cumulative absolue : 0.0082285

- l'est :

refroidissement ATE1, 200 simulations
moyenne : 1053.9497
écart type : 16.7142
coefficient de variation : 0.015859
erreur cumulative absolue : 0.011252

refroidissement ATE2A, 200 simulations
moyenne : 1253.2124
écart type : 12.0373
coefficient de variation : 0.0096051
erreur cumulative absolue : 0.0077416

refroidissement ATE2, 200 simulations
moyenne : 1218.8198
écart type : 11.3339
coefficient de variation : 0.0092991
erreur cumulative absolue : 0.007467

refroidissement ATE3, 200 simulations
moyenne : 1077.4856
écart type : 10.5569
coefficient de variation : 0.0097977
erreur cumulative absolue : 0.0079864

- l'ouest :

refroidissement ATO1, 200 simulations
moyenne : 1023.466
écart type : 13.6132
coefficient de variation : 0.013301
erreur cumulative absolue : 0.010826

refroidissement ATO2A, 200 simulations
moyenne : 1244.6793
écart type : 12.9605
coefficient de variation : 0.010413
erreur cumulative absolue : 0.0079544

refroidissement ATO2, 200 simulations
moyenne : 1196.7043
écart type : 11.9918
coefficient de variation : 0.010021
erreur cumulative absolue : 0.0079226

refroidissement ATO3, 200 simulations
moyenne : 1062.4733
écart type : 12.1907
coefficient de variation : 0.011474
erreur cumulative absolue : 0.0093126

2. les appartements à orientations doubles :

- le nord-est :

refroidissement ATNE1, 200 simulations
moyenne : 976.3506
écart type : 29.6233
coefficient de variation : 0.030341
erreur cumulative absolue : 0.023358

refroidissement ATNE2A, 200 simulations
moyenne : 1227.2616
écart type : 19.2951
coefficient de variation : 0.015722
erreur cumulative absolue : 0.012148

refroidissement ATNE2, 200 simulations
moyenne : 1183.1639
écart type : 17.3007
coefficient de variation : 0.014622
erreur cumulative absolue : 0.011089

refroidissement ATNE3, 200 simulations
moyenne : 1070.5407
écart type : 19.0016
coefficient de variation : 0.01775
erreur cumulative absolue : 0.013805

- le nord-ouest :

refroidissement ATNO1, 200 simulations
moyenne : 955.1534
écart type : 28.5445
coefficient de variation : 0.029885
erreur cumulative absolue : 0.021997

refroidissement ATNO2A, 200 simulations
moyenne : 1223.2092
écart type : 23.1232
coefficient de variation : 0.018904
erreur cumulative absolue : 0.014272

refroidissement ATNO2, 200 simulations
moyenne : 1169.601
écart type : 19.8423
coefficient de variation : 0.016965
erreur cumulative absolue : 0.012666

refroidissement ATNO3, 200 simulations
moyenne : 1063.3745
écart type : 20.2965
coefficient de variation : 0.019087
erreur cumulative absolue : 0.014596

- le sud-est :

refroidissement ATSE1, 200 simulations
moyenne : 1171.8053
écart type : 25.674
coefficient de variation : 0.02191
erreur cumulative absolue : 0.01538

refroidissement ATSE2A, 200 simulations
moyenne : 1429.1889
écart type : 24.1623
coefficient de variation : 0.016906
erreur cumulative absolue : 0.013091

refroidissement ATSE2, 200 simulations
moyenne : 1390.4113
écart type : 20.9082
coefficient de variation : 0.015037
erreur cumulative absolue : 0.011938

refroidissement ATSE3, 200 simulations
moyenne : 1271.7496
écart type : 26.001
coefficient de variation : 0.020445
erreur cumulative absolue : 0.016229

- le sud-ouest :

refroidissement ATSO1, 200 simulations
moyenne : 1150.6641
écart type : 22.576
coefficient de variation : 0.01962
erreur cumulative absolue : 0.015379

refroidissement ATSO2A, 200 simulations
moyenne : 1424.247
écart type : 20.1933
coefficient de variation : 0.014178
erreur cumulative absolue : 0.011293

refroidissement ATSO2, 200 simulations
moyenne : 1376.5206
écart type : 19.1678
coefficient de variation : 0.013925
erreur cumulative absolue : 0.010713

refroidissement ATSO3, 200 simulations
moyenne : 1261.8017
écart type : 23.8762
coefficient de variation : 0.018922
erreur cumulative absolue : 0.014808